

Alianza Editorial

Alianza Universidad

Ilya Prigogine e
Isabelle Stengers

La nueva alianza

Metamorfosis de la ciencia

Versión española de:
Manuel García Velarde

Traducción de la nueva edición española:
María Cristina Martín Sanz

Revisión de la nueva edición:
Diego Rasskin Gutman.

Alianza
Editorial

Título original:
La nouvelle alliance - Métamorphose de la science

Primera edición en «Alianza Universidad»: 1983
Segunda edición en «Alianza Universidad»: 1990
Cuarta reimpresión de la segunda edición en «Alianza Universidad»: 2004

Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15; 28027 Madrid; teléf. 91 393 88 88
www.alianzaeditorial.es
ISBN: 84-206-2368-7
Depósito legal: M. 3.452-2004
Fotocomposición: EFCA, S. A.
Doctor Federico Rubio y Galí, 16. 28039 Madrid
Impreso en Anzos, S. L. Pol. Ind. Cordel de la Carrera
Calle La Zarzuela, 6. Fuenlabrada (Madrid)
Printed in Spain

INDICE

Libro II

LA CIENCIA DE LA COMPLEJIDAD

Libro III

DEL SER AL DEVENIR

PREFACIO A LA SEGUNDA EDICION

Hace seis años escribíamos: «Hemos escogido presentar las cosas en su estado actual aun sabiendo cuán incompletas son nuestras respuestas y cuán imprevisibles son los problemas que suscitarán nuestras actuales teorías». Hoy nos encontramos en una situación similar y, sin embargo, desde que escribimos *La nueva alianza*, ¡qué largo camino hemos recorrido!

En el siglo XX la física fundamental se había identificado con la búsqueda de lo infinitamente pequeño o de lo infinitamente grande, de modo que, años atrás, si se le hubiera preguntado a un físico qué es lo que queda por explicar en el mundo de los fenómenos físicos, sin duda habría respondido que todavía no comprendemos de manera satisfactoria las partículas elementales o la evolución cosmológica, pero que el mundo de nuestra escala no puede reservarnos ya verdaderas sorpresas. Este tipo de convicción, en cuanto a una próxima terminación de la física, parece ser un fenómeno periódico. Recordemos lo que decía Laplace respecto del triunfo de la mecánica: «No podrá haber dos Newton, porque no habrá un segundo mundo a descubrir. A finales del siglo XIX, de nuevo, reinaba la convicción de que la física había llegado a su límite. Y aún hoy, S. Hawking, uno de los grandes teóricos de la astrofísica, anuncia "el fin de la física

teórica" y prevé un futuro próximo en el que los ordenadores verificarán numéricamente la concepción unificada que había acabado de formular la física teórica.»

Sin embargo, con los años han proliferado nuevas cuestiones que nos hacen ver hasta qué punto ignoramos de qué es capaz esta materia que creíamos conocer. El carácter específico de lo biológico, la génesis del concepto de información, los conceptos de estructura y orden constituyen hoy día la base de la renovación del saber que tiene como problema el mundo de nuestra escala. Y los nuevos conceptos que se abren paso en este mundo macroscópico se dirigirán, sin duda, hacia el campo de las partículas elementales y de la cosmología. La idea misma de una física de vanguardia definida como exploración de los límites de aquello que podemos alcanzar, la física de las altas energías, la física de los confines del Universo, está en trance de desaparecer. La exploración del mundo que conocemos se revela también rica en sorpresas y en nuevas perspectivas, además del vertiginoso descubrimiento de lo infinitamente grande o lo infinitamente pequeño. La ciencia no está sino dando sus primeros pasos.

Se debería escribir otro libro para hacer un bosquejo de esta renovación. Aquí nos limitaremos a subrayar algunos aspectos que nos permitirán profundizar en las tesis enunciadas en *La nueva alianza*.

A todos los niveles, la ciencia redescubre el tiempo. Y quizá la problemática del tiempo nos permita ver dibujarse un nuevo tipo de unidad del conocimiento científico. Pero no, por cierto, el concepto unitario del mundo físico que, al comienzo de este siglo, había sido presentado como el objeto último de la investigación científica. En esta perspectiva, ya lo hemos subrayado, el tiempo era un enemigo, la diversidad de los procesos temporales debía ser negada, reducida a una mera apariencia. Signo de lo que fue la contradicción esencial entre lo que significaba para un físico «comprender» y la ambición de entender un mundo susceptible de producir a los seres humanos y su historia, el tiempo múltiple y enmarañado que descubriremos puede convertirse en el hilo conductor de una exploración que permita articular sin reducir, explicar sin negar.

El redescubrimiento del tiempo en las ciencias del mundo fisicoquímico testifica en sí mismo que la historia de la ciencia no es una lenta acumulación de datos que se incorporan en un enunciado simple y unánime. La historia de la ciencia es una historia conflictiva, de elecciones, de apuestas, de redefiniciones inesperadas. Quizá el ejemplo más dramático de esta historia repleta de sorpresas y cambios de

sentido sea la historia del concepto de Universo temporal que vivimos hoy día.

¡Qué triunfo más hermoso para una física que negaba el tiempo, que el Universo cuadridimensional concebido por Einstein! ¡Y qué drama más intenso que el descubrimiento del carácter evolutivo del mismo! La ecuación cosmológica que construyó Einstein no admitía el Universo estático que él quería describir más que a título particular. Ya entonces, la temporalización de la geometría sustituía a la geometrización del tiempo. La expansión del Universo, la huida de las galaxias, cuyo testimonio observable define la ley de Hubble, hacía del mundo que nosotros estudiamos no una verdad eterna, sino un simple momento cósmico. Pero la límpida imagen de un Universo geométrico, aun cuando fuera en expansión, iba a enturbiarse también. En 1965, Wilson y Penzias descubren la famosa *radiación residual* prevista ya en 1947 por Alpher y Herman. La medida de dicha radiación de tres grados Kelvin, interpretada como un rastro del inimaginable instante inicial de la expansión que implica la ecuación de Einstein, iba a reavivar el problema de la cosmología, ahora ya *cosmogénesis, esto es, el estudio* de la evolución térmica del Universo. En la actualidad, nos encontramos en una tercera etapa, porque, inevitablemente, se plantea el problema de las condiciones térmicas de la génesis del Universo, del momento original cuyo vestigio es la radiación residual. Y esta vez es el concepto de un Universo termodinámico lejos del equilibrio lo que penetra la cosmología.

La noción de una entropía del Universo es ya antigua. Pero la evolución termodinámica que permitía definir era una simple evolución adiabática, que refleja el progresivo enfriamiento de un universo en equilibrio térmico y en expansión. La cuestión ahora es la del proceso de no-equilibrio inicial que pudo producir al mismo tiempo los fotones inertes que miden la radiación residual y las partículas con masa propia de que estamos hechos.

La perspectiva que se abre ante nuestros ojos es la de un cambio de fase primordial, que produjo radiación y partículas con estructura, probablemente inestables, inscrito en la irreversibilidad de la materia, del mismo modo que ésta se encuentra inscrita en la vida. La radiación solar que baña la Tierra es, sin duda alguna, sinónimo de disipación, pero no es menos cierto que es también responsable de la creación de biomoléculas de estructura compleja. Que el mismo tipo de dualidad pueda encontrarse en el origen de nuestro Universo simboliza de manera dramática la transformación de las relaciones entre

el tiempo y la existencia. Lejos de poder someter nuestro concepto del tiempo a las regularidades observables del comportamiento de la materia, debemos comprender la idea de un tiempo productor, un tiempo irreversible que ha engendrado el Universo en expansión geométrica que observamos y que todavía engendra la vida compleja y múltiple a la que pertenecemos.

Nos habríamos sentido tentados a dedicar más espacio a los múltiples argumentos existentes en la actualidad sobre el origen del universo [1]. Pero debemos contentarnos con hacer esta rápida alusión, para volvernos ahora hacia el mundo de nuestra escala que ha invadido, también, la disipación.

Una noción crucial a este respecto es la noción de atractor. Los ejemplos de atractores son innumerables y bien conocidos por la física. El péndulo real, que se va inmovilizando progresivamente, alcanza su estado atractor. Un líquido caliente cuya temperatura se iguala progresivamente con la de su entorno, adquiere su estado atractor. Allí donde la física y la química han contado con componentes estables y reproductibles, estas ciencias, al igual que las prácticas humanas que las preceden, han identificado los estados atractores y las evoluciones que conducen a los mismos.

La estabilidad que implica la existencia de un estado atractor es, en efecto, más fuerte que la que puede caracterizar un sistema dinámico. Refleja la diferencia intrínseca entre los sistemas disipativos, del péndulo real a las reacciones químicas, y los sistemas conservativos que describe la dinámica clásica. Si un meteoro perturba la órbita de la Tierra, ésta no recuperará jamás sus valores iniciales. La trayectoria dinámica es incapaz de olvidar aquello que la ha perturbado. El péndulo real volverá al estado de reposo, sea cual sea la perturbación.

---

[1] Para el problema de la evolución térmica del Universo, véase S. Weinberg, *Los tres primeros minutos del universo*, Madrid, Alianza, 1978. Para los argumentos sobre el origen, P. C. Davies, *The Accidental Universe*, Cambridge, University Press, 1982; A. D. Linde, «The Inflationary Universe», en *Rep. Prog. Physics*, vol. 47, 1984, pp. 925-986; A. Vilekin, «Birth of Inflationary Universes», en *Physical Review D*, vol. 27, 1983, p. 2848; E. Gunzig y P. Nardone, «From Unstable Minkovsky Space to the Inflationary Universe», en *General Relativity and Gravitation Journal*, vol. 16, 1984, p. 305; E. Gunzig, «Self-Consistent Cosmology, Inflationary Universe and all of that...», a publicar en *Fundamental of Cosmic Physics*, J. Geheniau e I. Prigogine, a publicar en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA, I. Prigogine, J. Geheniau y E. Gunzing, a publicar en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA.

Como ya habíamos mencionado (p. 160), el estado atractor une la estabilidad al *olvido* de las perturbaciones; y es este tipo de estabilidad lo que da sentido a la idea de reproductibilidad: en circunstancias semejantes se producirá una evolución semejante; la estabilidad asociada a los estados atractores permite que las circunstancias «semejantes» en cuestión no impliquen una identidad de sistemas hasta en sus menores detalles, sino solamente su pertenencia a la misma cuenca de atracción.

En el capítulo titulado «Los tres estadios de la termodinámica», hemos descrito la ampliación progresiva de la termodinámica a situaciones que quedaban excluidas de ella en un principio: las situaciones de no-equilibrio permanente determinadas por flujos de energía o de materia que mantienen los procesos disipativos en el interior de un sistema y le impiden alcanzar su atractor, el estado de equilibrio. Hemos visto que, cerca del equilibrio, el estado estacionario correspondiente a la producción mínima de entropía permite definir un estado atractor esencialmente análogo al estado de equilibrio. Pero, lejos del equilibrio, pueden aparecer otros tipos de atractores y particularmente el «ciclo límite», correspondiente a un comportamiento temporal periódico adoptado de manera espontánea por el sistema. Este es, más allá de un punto crítico que marca la inestabilidad de los estados estacionarios análogos al estado de equilibrio, el campo de las «estructuras disipativas».

Desde entonces, se han descubierto nuevos tipos de «atractores», que enriquecen la dialéctica de lo regular y lo aleatorio [2]. Una estructura disipativa de comportamiento periódico se caracteriza por un comportamiento regular. En efecto, su génesis remite a la inestabilidad de un estado estacionario y a la amplificación de una fluctuación hasta dimensiones macroscópicas, pero, una vez creadas, su comportamiento es previsible y estable en relación con las fluctuaciones (esto es, en un dominio bien determinado de valores que caracterizan la intensidad de los flujos que la alimentan).

Pero los físicos y los matemáticos conocen ahora un nuevo tipo de atractor que no permite prever un comportamiento regular. Dichos atractores no corresponden a un punto, como en el estado de equilibrio, o a una línea, como en el ciclo límite, sino a un conjunto denso de puntos, lo bastante denso como para que sea posible en-

[2] Véase A. Berge; Y. Pomeau, y C. Vidal, *L'ordre dans le chaos*, París, Herman, 1984, y H. G. Schuster, *Deterministic Chaos*, Weinheim, Physik-Verlag, 1984.

contrar puntos en cualquier zona del mismo, por pequeña que ésta sea. Se trata de un conjunto al que se puede atribuir una dimensión «fractal». Los atractores de este tipo implican, por parte del sistema al que caracterizan, un comportamiento de tipo caótico. Atractor y estabilidad dejan de ir juntos a partir de este punto. David Ruelle ha caracterizado estos «atractores extraños», también llamados «atractores fractales», por su gran sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que significa que el atractor no se caracteriza ya por su insensibilidad a las pequeñas variaciones de sus parámetros. Toda pequeña variación es susceptible de producir efectos sin medida, de trasladar el sistema de un estado a otro muy diferente, lo cual, dado que dichas variaciones son esencialmente inevitables, significa que el sistema «vagará» sin fin de un estado a otro explorando el conjunto del «espacio de fases», es decir, el espacio recubierto de manera fractal por sus posibles estados atractores, adoptando un comportamiento análogo al de los regímenes de turbulencia que nos encontramos en la vida diaria.

La oposición entre determinismo y aleatoriedad ha sido rebatida ya dos veces. El estado atractor simple, que garantiza la posibilidad de prever de forma determinista el estado futuro de un sistema puede, como hemos explicado (pp. 161-167), ser interpretado como la resultante de comportamientos microscópicos representados ellos mismos como esencialmene aleatorios. Sin embargo, a la inversa, una descripción macroscópica en términos de ecuaciones diferenciales, que parezca encarnar el determinismo causal, ya que relaciona la variación del sistema en un momento dado con el estado del sistema en este momento, genera aquí un comportamiento observable de tipo aleatorio. Por consiguiente, a partir de ahora nuestras descripciones del mundo se organizarán en torno a los temas de estabilidad e inestabilidad y no a la oposición entre azar y necesidad.

Se puede ir aún más lejos e intentar «resucitar el sistema dinámico» que genera eventualmente una serie de observables de tipo aleatorio. Volveremos sobre este punto en el apéndice II, pero tomemos ahora un ejemplo particularmente sorprendente. Los fenómenos meteorológicos constituyen el ejemplo tipo de fenómeno inestable, aparentemente aleatorio. Se sabe que numerosos factores se entremezclan en la descripción de las variaciones meteorológicas a corto plazo. A propósito de las variaciones meteorológicas a largo pazo, se puede hacer la siguiente pregunta: ¿es pertinente tratar de entenderlas a partir de «modelos generales» que impliquen un gran número de variables? Conocemos las variaciones violentas que ha sufrido el

clima. Hace doscientos o trescientos millones de años, por ejemplo, prácticamente no había hielo sobre los continentes y el nivel del mar era unos ochenta metros más alto que en la actualidad. Conocemos la serie de glaciaciones que marca la era cuaternaria y su periodicidad media de unos cien mil años. ¿Es pertinente tratar de construir un modelo que explique estas variaciones violentas a partir de unos mecanismos hipotéticos específicos?

Los progresos recientes en el estudio del comportamiento de los sistemas dinámicos permiten determinar si una secuencia temporal aparentemente aleatoria de observaciones que caracteriza el estado de un sistema puede o no corresponder a un comportamiento caótico generado por un sistema de ecuaciones deterministas [3]. Además, es posible determinar el número de variables independientes que pondría en juego este conjunto de ecuaciones desconocidas. Aplicados a una serie de observables que caracterizan la variación a largo plazo del clima terrestre, estos métodos producen un resultado sorprendente: dichas variaciones podrían ser generadas por un sistema de ecuaciones de cuatro variables independientes [4], lo cual significa que es inútil tratar de identificar las «variables ocultas» de los mecanismos específicos que darían cuenta de las fluctuaciones violentas del clima. Debemos atribuir al sistema climático una complejidad intrínseca, una imprevisibilidad que no permitirá un mejor conocimiento de los mecanismos que la rigen, porque no refleja el gran número de factores que intervienen en ella, sino la inestabilidad del comportamiento climático.

Otro ejemplo de este tipo de modelización, que no tiene por ambición *juzgar* un fenómeno, sino encontrar el tipo de razonamiento *pertinente* para una serie de observaciones que lo caracteriza, es la actividad eléctrica del cerebro, tal como la miden los electroencefalogramas. Se ha podido demostrar que los valores que caracterizan el sueño profundo corresponden a un atractor fractal con cinco variables independientes. Por tanto, nos volvemos a encontrar la misma asociación contrastada entre simplicidad y complejidad [5]. El entre-

---

[3] P. Grassberger e I. Procaccia, en *Physica*, 9D, 1983, pp. 189-208.

[4] C. Nicolis y G. Nicolis, «Is there a Climatic Attractor?», en *Nature*, vol. 311, 1984, pp. 529-532.

[5] A. Babloyantz; J. M. Salazar, y C. Nicolis, «Evidence of Chaotic Dynamics of Brain Activity During the Sleep Cycle», en *Physics Letters*, vol. 111A, 1985, pp. 152-156. El mismo método se aplicó al estudio de una crisis epiléptica: A. Des-

cruzamiento casi inimaginable de los miles de millones de neuronas que constituyen nuestro cerebro se deja representar, en lo que concierne a esta serie de observaciones, por un sistema de ecuaciones dinámicas relativamente simple, pero dicho sistema se caracteriza por su complejidad dinámica intrínseca, por la inestabilidad del comportamiento que genera. De esta manera se inicia una nueva vía de acceso a la inteligibilidad del comportamiento cerebral basada en la idea de la pertinencia de esta idea de inestabilidad. Y, en la medida en que el cerebro es el producto de millones de años de evolución selectiva, no podemos dejar de preguntarnos si la posibilidad de tal caracterización tiene algún significado en lo que concierne al papel desempeñado por el cerebro, así como, por ejemplo, acerca de su sensibilidad al mundo que rodea a los seres vivos. En otras palabras, la inestabilidad dinámica que permite caracterizar ciertos aspectos del comportamiento del cerebro, ¿será producto de la evolución biológica?

Digámoslo de paso: se ve perfilarse una vía que evita los peligros simétricos del reduccionismo, que lleva las experiencias vividas a las conexiones de las neuronas, y de su contrario, que niega toda pertinencia al enfoque neurofisiológico para comprender esta experiencia. Mediante el enfoque fisiológico se puede explorar la forma en que se concretan los problemas planteados al ser vivo. Así, David Ingvar [6] propone una distinción neurofisiológica entre recuerdos de diferente tipo. Habla, a propósito del córtex frontal, de la producción de «recuerdos del futuro», de un tratamiento de los acontecimientos del pasado, que extraería de ellos relaciones causales y permitiría organizar el comportamiento en términos de anticipación y previsión. No se trata aquí de reducir a mecanismos neuronales la distinción, constitutiva de nuestra experiencia, entre pasado, presente y futuro, ni de utilizar la referencia a tales mecanismos para legislar en cuanto al modo correcto de describir anticipaciones y previsiones. La exploración (medición del metabolismo y de los flujos sanguíneos locales) se deja guiar, en la cartografía del «paisaje funcional» del cerebro que intenta construir, por la distinción entre pasado, presente y futuro, tal como se da en la experiencia vivida. El eventual carácter específi-

---

texhe y A. Babloyantz, «Low Dimensional Chaos in an Epileptic Seizure», a publicar en *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*.

[6] D. Ingvar, «Memory of the Future. An Essay on the Temporal Organization of Conscious Awareness», en *Human Neurobiology*, 4, 1985.

co señalado entre diferentes zonas de actividad cerebrales no permite, por tanto, explicar que vivamos de maneras diferentes la anticipación del futuro y el recuerdo del pasado, sino que refleja la diferencia intrínseca entre el problema que debe resolver toda acción orientada hacia el futuro y el problema de la integración en la experiencia presente que ha vivido el sujeto.

No obstante, los atractores no son más que un aspecto del problema que constituye la concepción de un mundo disipativo porque, además, la relación entre microscópico y macroscópico es, a partir de ahora, relativa al problema de la estabilidad. El segundo principio define como estado atractor el estado de equilibrio termodinámico de un sistema aislado. Garantiza su estabilidad, es decir, la regresión de las fluctuaciones que no cesan de perturbarle. Es la estabilidad del estado macroscópico lo que da sentido a la descripción en términos de valores medios, que constituye un sistema de ecuaciones diferenciales. El determinismo de estas ecuaciones tiene su raíz en la posibilidad de separar los órdenes de tamaño, de distinguir el valor medio de la actividad microscópica fluctuante que él genera.

El «orden de fluctuación» refleja el hecho de que esta separación no siempre es posible para los sistemas que se encuentran lejos del equilibrio. El papel que juegan las fluctuaciones en los puntos de inestabilidad en los que el sistema es susceptible de bifurcarse, de adoptar un nuevo régimen macroscópico, no es ni mucho menos recurrir arbitrariamente a la ignorancia. Todo lo contrario, puede decirse que los puntos de inestabilidad y la imposibilidad de separar el valor medio y la actividad microscópica fluctuante que señalan, reflejan una «sobre-determinación» del sistema. Un estado macroscópico estable es un estado indiferente a los detalles de su propia actividad. Una desviación local del equilibrio medio no tiene ninguna consecuencia. Por el contrario, en el punto crítico aparecen *correlaciones* a gran distancia. Toda fluctuación tiene entonces consecuencias que se propagan a través de todo el sistema.

Fluctuación e inteligibilidad no se oponen, por tanto, más de lo que lo hacen determinismo y aleatoriedad, sino que juntas forman el marco de cuestiones que no presuponen ya la distinción entre macroscópico y microscópico como un hecho, sino que lo encuadran como un problema. De la misma forma que la asociación entre atractor macroscópico y estabilidad se revela no por una propiedad general, sino que es un caso particular dentro del campo de los atractores fractales, también aquí es la noción de descripción macroscópica y,

por tanto, de los atractores que dicha descripción permite deducir, la que pierde su carácter de generalidad. El estado de equilibrio constituyó durante mucho tiempo el modelo de inteligibilidad de las relaciones entre macroscópico y microscópico. A partir de ahora puede definirse como el estado singular en el que las correlaciones son de alcance e intensidad nulas.

Toda nuestra experiencia, pero en lo sucesivo también nuestro conocimiento, nos señala un Universo temporalmente polarizado. Pero, ¿qué significa esta polarización? ¿No es más que apariencia, relativa a nosotros? ¿O tal vez es reflejo de una estructura fundamental intrínseca? Este problema constituía el objeto de *La nueva alianza.* Lo retomamos en el apéndice I, en donde describimos los desarrollos recientes que permiten clarificarlo y profundizar en él. Nos gustaría recordar aquí de qué se trataba.

La cuestión no es otra que la idea de ley física en sí misma. La dinámica clásica se consagró al estudio de fenómenos periódicos, como el movimiento de los astros y, con una elegancia y concisión incomparables, expresó la verdad: dichos fenómenos ignoran la dirección del tiempo, son repetición indefinida del pasado en el futuro. La cuestión es saber si esta verdad corresponde a la vocación de esta ciencia o si, por el contrario, pueden definirse nuevas formulaciones que se salen del marco conceptual de la ciencia clásica, incluso prolongada por la mecánica cuántica y la relatividad.

Retomenos el ejemplo del dado (p. 276). Si el dado es el instrumento de un juego de azar, se debe a que se sabe que, siempre que se lanza, tiene una posibilidad entre seis de caer en una de las seis posiciones posibles. Por tanto, cada caso particular es imprevisible. Por supuesto, se podrá objetar que un conocimiento ideal transformaría la situación. A una de las caras correspondería una probabilidad de uno y a todas las otras una probabilidad cero. Aquí se plantea el problema: ¿cómo se debe llamar a la ley dinámica del dado? ¿Ley determinista? ¿Ley probabilista?

No se trata de un problema general, sino de un problema *impuesto* por el carácter inestable del movimiento del que el dado sirve de ejemplo. Desde comienzos de siglo se ha acusado a menudo de «positivismo» cualquier reflexión que parezca amenazar la concepción «objetiva» de la naturaleza, es decir, la posibilidad de que la física tienda, aunque sea de manera indefinida, hacia un punto de vista de la naturaleza esencialmente análogo al que tendría un Dios creador. Hoy día, se denunciará como «instrumentalista» la idea de tomar en

cuenta el carácter finito de toda descripción física. Es evidente que, si el movimiento dinámico fuera estable por regla general, el paso al límite de nuestro conocimiento finito a la descripción ideal no plantearía problema alguno y que atribuirle un significado fundamental sólo podría ser el resultado de una concepción filosófica *a priori*. El descubrimiento de los sistemas dinámicos inestables ha situado a la física en una encrucijada. O bien desdeña el problema y mantiene un formalismo, como veremos más adelante, centrado en torno a un ideal que en lo sucesivo será inaccesible, incluso para las medidas ideales, indefinidamente precisas; o bien acepta el problema y define de nuevo un formalismo que la libere de los conceptos según los cuales *solamente* el cambio total hacia una medida ideal podría proporcionar un correlato observable (la trayectoria para los sistemas dinámicos inestables, la función de onda para los sistemas cuánticos inestables).

Tomemos un ejemplo clásico de paso al límite, el del polígono inscrito en un círculo que, por multiplicación de sus vértices, tiende hacia dicho círculo. Esta transformación puede describirse como sigue: la suma de las longitudes de los lados del polígono tiende de manera continua a la longitud del círculo. También se aprecian ciertos aspectos cualitativos: la curvatura del polígono es cero en todos sus puntos excepto en los vértices, al contrario que el círculo; pero como el número de sus vértices aumenta de manera continua, la transformación cualitativa está también inscrita en la continuidad de la transformación. Del mismo modo, en lo que concierne a un sistema dinámico estable, el paso al límite en la precisión de la descripción del sistema no plantea ningún problema en particular. Dios, el diablillo de Laplace o el físico disponen del mismo tipo de conocimiento y pueden realizar el mismo tipo de descripción con un número de decimales aproximado. Por el contrario, en lo que se refiere al lanzamiento del dado, toda imprecisión, por mínima que sea, toda distancia entre una precisión que tiende al infinito y una previsión positivamente infinita, aumenta la diferencia entre comportamiento previsible e imprevisible.

Por tanto, no se trata del problema general de la legitimidad del paso al límite entre finito e infinito, sino de la legitimidad de descripciones que suponen un modo de conocimiento por principio inaccesible. Nuestra tesis es que no se puede hablar de «leyes físicas» más que a propósito de descripciones «robustas» en relación con el paso al límite entre conocimientos potencial y actualmente infinitos.

A partir de la clasificación de los sistemas dinámicos hecha por

Poincaré [7], se sabe que algunos de ellos, en particular los sistemas «de desfase de Bernoulli» (ver apéndice I), tienen las mismas características que hemos atribuido al juego de dados: para estos sistemas, según nuestra tesis, se debe abandonar la idea de una ley de evolución determinista. A propósito de este tipo de sistema, la dinámica clásica debe dejar sitio a un nuevo formalismo matemático que integra el carácter finito de nuestra información, aun cuando ésta sea arbitrariamente exacta.

Debemos subrayar que los sistemas dinámicos inestables *no son* una rareza. A partir de ahora forman parte integrante de la dinámica celeste y no sólo en forma de interrogantes sobre su futuro a largo plazo, sino también como instrumento que da acceso al problema de la distribución de los cuerpos celestes que podemos observar [8]. Ellos son el punto de partida de lo que los físicos consideran «la renovación de la mecánica».

La renovación de la mecánica nos lleva a modificar el concepto de ley física que había creado la mecánica clásica. La ley de evolución clásica tenía por objeto un sistema individual al que correspondía una descripción determinista. Sin duda, se trataba de una idealización, puesto que toda medida de precisión finita, por grande que sea dicha precisión, sólo puede definir un conjunto de sistemas y no un sistema individual. Esta idealización, legítima en tanto que sistemas semejantes poseerán evoluciones semejantes, resulta inadmisible para los sistemas dinámicos inestables. Pero precisamente la representación que permite construir no corresponderá ya sino a un caso límite en particular: el de los sistemas estables.

La representación general, centrada en torno a sistemas inestables, tendrá por objeto conjuntos correspondientes a sistemas de comportamiento semejante según las medidas de precisión finita y la evolución dinámica caracterizará el comportamiento esencialmente probabilista de tales conjuntos. El formalismo que nosotros proponemos corresponde, en términos técnicos, a una representación del sistema

---

[7] Sobre este tema véase I. Ekeland, *Le calcul et l'imprévu*, París, Seuil, 1984.

[8] Así, por efecto de resonancia con Júpiter, los cometas pueden capturarse. Formarán una nube que sigue una órbita parabólica alrededor del sol. El movimiento de cada cometa es en sí mismo imprevisible, pero la dinámica puede prever la estructura de la *nube* de cometas. Se trata, por tanto, de un conjunto de cuerpos y no de un cuerpo individual, que puede ser definido como objeto dinámico. Véase T. Y. Petrovsky, «Chaos and Cometary Clouds in the Solar System», en *Physical Review Letters*.

dinámico cuya estructura es la de un semigrupo. En otras palabras, rompe la simetría temporal de la evolución dinámica y permite definir con exactitud el significado de la irreversibilidad física.

A posteriori, podría parecer que nuestro procedimiento no es esencialmente distinto del de Boltzmann. El utilizó un formalismo probabilista para dar sentido a la flecha del tiempo. Asimismo, aquí aprovecharemos la posibilidad de proporcionar una descripción probabilista a los sistemas dinámicos inestables para definir esta misma flecha del tiempo. Sin embargo, la diferencia entre ambos es fundamental. Una de las mayores paradojas de la descripción probabilista de Boltzmann es la de presuponer de hecho la ruptura de la simetría temporal que parece justificar. Los argumentos probabilistas aplicados al pasado, es decir, remontándose desde un estado improbable hasta las situaciones pasadas que han podido producirlo, llevan a la conclusión de que dichas situaciones debían ser *más probables*. Tales argumentos permiten, por tanto, afirmar *de manera simétrica* que, dada una situación presente improbable, su evolución futura será hacia situaciones más probables y su aparición espontánea en el pasado a partir de situaciones igualmente más probables, es decir, tanto el tipo de evolución descrito por el segundo principio de la termodinámica como el tipo de evolución que él excluye. Los argumentos probabilistas no permiten comprender la aparición de una flecha del tiempo en los fenómenos concebidos como simétricos respecto a ese tiempo. Antes bien, presuponen una práctica que rompe definitivamente la simetría recurriendo a las probabilidades tan sólo para caracterizar las evoluciones hacia el futuro.

Por esta razón, solamente una representación dinámica en semigrupo, que rompa la simetría temporal de las ecuaciones de evolución dinámica, da un sentido intrínseco al concepto de probabilidades asociado a ese tipo de evolución. Mientras que las probabilidades de Boltzmann nos remitían directamente al carácter aproximativo de las descripciones humanas, la descripción de los sistemas dinámicos inestables permiten crear una definición rigurosa de dicha probabilidad, esencialmente independiente del nivel de precisión de la definición del sistema.

Correlativamente, a partir de ahora puede plantearse la siguiente cuestión: ¿en qué dirección fluye el tiempo físico? Boltzmann había excluido las situaciones iniciales que generan evoluciones antitermodinámicas, prohibidas por el segundo principio, apelando a su improbabilidad. Pero el problema es que, en la representación clásica,

los estados dinámicos que engendran respectivamente una evolución termodinámica y una evolución antitermodinámica son esencialmente *equivalentes:* al uno le corresponde el otro por inversión de la flecha del tiempo.

Esta equivalencia se rompe también en la nueva representación y los dos tipos de estados se revelan intrínsecamente diferentes. Desde ese momento, se podrá definir la dirección temporal a partir de la dinámica inestable del sistema. Así lo demostraremos en el apéndice I, a propósito de la transformación del panadero: en este caso, la «fibra dilatadora» define la evolución del sistema en la dirección del futuro.

Sin duda, la transformación más esencial implicada en la nueva representación dinámica es la que concierne al concepto de estado instantáneo. A los conceptos de trayectoria o función corresponde el concepto de un estado como un corte, neutro en cuanto a la dirección del tiempo, capaz de crear de manera esencialmente simétrica la evolución hacia el pasado y hacia el futuro. A los nuevos objetos de la dinámica (y de la mecánica cuántica), definidos como conjuntos de sistemas que tienen el mismo comportamiento observable, corresponde el concepto de un estado que pertenece a una evolución con un sentido definido y que mantiene relaciones diferentes con su pasado y con su futuro.

La articulación clásica entre estado y evolución representaba a éstos como esencialmente heterogéneos, lo cual implica el propio concepto de ley de evolución. El sistema se caracteriza, en un momento dado, por un estado ajeno a toda temporalidad y sometido a una ley que impone su evolución. O bien, dicha heterogeneidad es en sí misma artificial. Todo estado —salvo el que nosotros mismos preparamos y quizá el estado inicial de un mundo creado por Dios— es resultado de una evolución. La idea de un estado dinámico portador de una flecha del tiempo integra lo que el punto de vista clásico rechazaba. La definición del estado la remite al pasado que lo produjo. El estado resulta de una evolución orientada en el tiempo y su definición preserva dicha orientación.

Esta nueva definición del estado dinámico instantáneo, esto es, del sentido que la física confiere al concepto de instante, refleja la inesperada riqueza conceptual de un formalismo liberado de toda referencia a la posibilidad de un punto de vista infinito. Desde el punto de vista clásico, el estado dinámico instantáneo no podía sino ser indiferente al sentido del tiempo. En efecto, como ya hemos comentado en nuestro capítulo sobre «La identificación de lo real», el co-

nocimiento de todo estado perteneciente a una trayectoria permite deducir todos los demás estados de dicha trayectoria, tanto hacia el pasado como hacia el futuro. En este sentido, el estado instantáneo, como corte en la evolución dinámica, carga, como ya decía Leibniz, con el pasado y con buena parte del futuro, y *de manera absolutamente simétrica*. Por tanto, el instante y la eternidad se reúnen en el concepto de estado dinámico clásico. Por el contrario, el estado dinámico marcado por la flecha del tiempo hace del instante un recuerdo del pasado, pero no su recuerdo integral, ya que dicho recuerdo, como toda descripción, sólo articula informaciones de precisión finita; correlativamente este instante representa un futuro esencialmente abierto.

Aristóteles definió el tiempo como la medida del movimiento en la perspectiva del antes y del después. Pero, ¿de dónde procedía dicha perspectiva? ¿Del espíritu que mide o del objeto medido? La física clásica, implícitamente, resolvió el interrogante de Aristóteles, escogiendo la primera opción. Cuando, con el segundo principio de la termodinámica, la distinción entre el antes y el después fue por fin tomada en cuenta por las descripciones físicas, tal decisión se confirmó y suscitó diversas interpretaciones subjetivistas que hicieron a las prácticas humanas responsables explícitas de tal distinción. Volver sobre esta decisión fundamental implica, como ya hemos dicho, una modificación del concepto de ley dinámica. Pero si la representación dinámica de los sistemas inestables que integra el carácter finito de nuestras observaciones encuentra las propiedades intrínsecas del mundo físico, dando sentido a preguntas, a distinciones, a nuevas posibilidades de observación, sin duda deberemos modificar nuestro propio concepto de la interacción física. Hasta ahora se admitía que, aunque no podamos hacer cálculos más que con un número finito de decimales, la naturaleza, por lo que a ella se refiere, procede sin aproximación. En este sentido, la naturaleza representada por la dinámica clásica es heredera del poder del Dios creador. Ella «se conoce a sí misma» con una exactitud positivamente infinita. Se corresponde con la imagen insomne de un museo monstruoso, incapaz de producir la menor distinción, de olvidar el menor detalle, repetición maníaca de lo que ha sido en lo que es. La dinámica que rompe la simetría temporal desemboca en la representación de un mundo en el que no tendría sentido la idea de una exactitud positivamente infinita; un mundo que se dirigiría no por aproximación, sino por discriminación, al seno de lo que asimilaría el punto de vista clásico.

Hoy encontramos los ecos de los primeros tiempos de la ciencia

moderna en los que iban paralelos la creación de los conceptos científicos y el pensamiento ontológico. El problema de la relación entre estado y evolucióm, entre el instante y el devenir, nos remonta a la época en la que Leibniz creó, a partir del principio de suficiencia de la razón, el modo de conceptualización que ha guiado a la física hasta nuestros días. La física actual inventa medios de liberarse del yugo de la suficiencia de la razón, de la equivalencia maestra entre «causa plena» y «efecto completo» y, por tanto, también trata de liberarse del Dios de la razón clásica, sólo él susceptible de poseer la información infinita susceptible de medir la plenitud de las causas y el carácter completo de los efectos. Jamás ciencia alguna responderá directamente a la pregunta de San Agustín «¿qué es el tiempo?», pero la labor de la cuestión del tiempo en el corazón de la ciencia, que produce el nacimiento de un proceso, memoria selectiva de su pasado y abierta sobre el futuro, restituye al modo de conceptualización de esta ciencia la dimensión filosófica que le pertenece por derecho.

Seis años después de la primera edición de este libro, podemos repetir lo que fue el tema principal de *La nueva alianza:* nuestro diálogo con la naturaleza no ha hecho más que empezar. En verdad diálogo, y no monólogo, a pesar de su carácter aparentemente unilateral. Porque no se trata de reducir la naturaleza a una entidad muda, sino de construir el significado de las preguntas que podemos dirigirle.

Y, como en todo verdadero diálogo, los puntos cruciales son aquéllos en los que podemos reconocer e incorporar en nuestra representación de lo otro, lo que hasta ese momento habíamos podido creer determinado únicamente por nuestra propia subjetividad.

Poincaré concluía *La valeur de la science* con una reflexión, de la que debe admirarse su belleza trágica: «Todo lo que no es pensamiento es la nada, puesto que no podemos pensar más que el pensamiento, y todas las palabras de que disponemos para hablar de las cosas no pueden expresar sino pensamientos; por tanto, decir que existe algo además del pensamiento, es una afirmación que carece de sentido. Y, sin embargo —extraña contradicción para los que creen en el tiempo—, la historia geológica nos demuestra que la vida es tan sólo un corto episodio entre dos eternidades de muerte y que, en este episodio, el pensamiento consciente no ha durado ni durará más que un momento. El pensamiento no es más que un relámpago en medio de una larga noche. Pero este relámpago lo es todo» [9].

[9] Poincaré, *La valeur de la science*, París, Flammarion, 1913, p. 276.

Quizá sea precisamente porque creemos en el tiempo y porque la inventiva intrínseca del diálogo científico con la naturaleza nos proporciona hoy los medios para comenzar a pensar en el tiempo, por lo que no vivimos la brevedad de la existencia humana como una contradicción. No podemos concebir el pensamiento como un monólogo solitario fuera del cual sólo existe la nada. Porque si bien el pensamiento no puede salir de sí mismo, sin embargo puede abrirse y crear; crear un nuevo concepto de lo que se llamó las «leyes de la naturaleza», que le llevaría —y ciertamente estamos aún dando nuestros primeros pasos vacilantes— a reconocerse a sí mismo como afirmación exacerbada de lo que dichas «leyes» admiten como posible.

Introducción

METAMORFOSIS DE LA CIENCIA

La ciencia ha conocido notables progresos a lo largo de los tres siglos que nos separan de Newton. Esto es un tópico. Quizá sea menos trivial mencionar hasta qué punto han cambiado nuestras ideas con respecto a la naturaleza que describimos y el ideal que guía nuestras descripciones. Ese es el tema esencial de este libro; partiendo de una naturaleza semejante a un autómata, sujeta a leyes matemáticas que tranquila y orgullosamente determinan para siempre su futuro, del mismo modo que determinaron su pasado, hoy nos encontramos en una situación teórica totalmente diferente, en una descripción que sitúa al hombre en el mundo que él mismo describe e implica la receptividad de dicho mundo. No es ninguna exageración hablar de esta transformación de conceptos como de una verdadera *metamorfosis* de la ciencia. Es el resultado de la lenta labor de algunas cuestiones a menudo planteadas «desde el origen», que siguen modificando ante nuestros ojos el interrogante científico.

Creemos que dichas cuestiones no fueron tan sólo cuestiones científicas y que lo que trata la metamorfosis de la ciencia no es siempre de índole científica. Curiosamente, hay una cuestión mucho más antigua que la ciencia moderna que no ha dejado de preocupar a algunos hombres de ciencia: las conclusiones que la existencia de la cien-

cia y el contenido de las teorías científicas pueden aportar en cuanto a la relación del hombre con el mundo natural. Semejantes conclusiones no pueden sernos impuestas por la ciencia como tal, sino que forman parte integrante de la historia de la metamorfosis de dicha ciencia. ¿Por qué hemos de extrañarnos? La ciencia forma parte del complejo cultural en el que, en cada generación, el hombre trata de encontrar una forma de coherencia intelectual. Y, a la inversa, dicha coherencia alimenta, en cada época, la interpretación de las teorías científicas, determina su repercusión, influye sobre los conceptos que se forman los científicos acerca de los resultados de su ciencia y de las vías sobre las cuales deben orientar su investigación. Más allá de su contenido teórico, la metamorfosis que vamos a describir renueva nuestro concepto de la relación del hombre con la naturaleza como práctica cultural.

Para situar de forma precisa estos diferentes temas, hemos escogido recordar la afirmación, de una claridad admirable, en la que Jacques Monod concentró hace poco la lección que él creía extraer de los progresos teóricos de la biología molecular: «La antigua alianza se ha roto; el hombre sabe, por fin, que está solo en la inmensidad indiferente del Universo, del que ha emergido por azar» [1].

Como demostraremos al expresar esta conclusión, Monod daba voz no sólo a una interpretación posible de ciertos resultados de la biología moderna, sino también de un conjunto teórico mucho más vasto, que llamaremos la ciencia «clásica»,y que dicha ciencia, a lo largo de tres siglos de existencia, no ha cesado de decir que el hombre es un extraño en el mundo descrito por ella. Ahora bien, nosotros tenemos derecho a constatar una paradoja: es lo que ocurre con la afirmación de Monod; su frase fue un acierto fulgurante, pero termina con una nota que parece trágica. La biología molecular ha descifrado el texto genético, cuya existencia constituía para algunos el secreto de la vida. Ha alcanzado también un logro que confirma el significado más profundo que podemos darle a la actividad científica: el de ser un intento de comunicación con la naturaleza —de aprender, mediante su contacto, quiénes somos y en qué modo participamos en su evolución—. Y he aquí que un fructífero intercambio hace que seamos unos seres solos en el mundo, gitanos en las fronteras del Universo.

[1] Monod, J., *Le Hasard et la nécessité,* Paris, Seuil, 1970, pp. 194-195.

El contexto en el que queremos situar la metamorfosis de la ciencia es el de una ciencia clásica cuyos aciertos han podido darse como trágicos y que hoy no consideramos ya como nuestra ciencia. Estudiemos ahora de forma más detallada esta ciencia clásica a fin de comprender la relación que propone entre su contenido teórico y su interpretación del «hombre» y de la práctica científica.

Ya hemos dicho que la ciencia podía ser definida como un intento de comunicación con la naturaleza, de establecer con ella una diálogo en el que surjan poco a poco preguntas y respuestas. Debemos precisar esta definición, ya que no permite descubrir lo que es propio de la ciencia, sea o no clásica. Puesto que en todas las épocas se ha intentado comprender la naturaleza, descubrir el secreto de sus estabilidades y raros acontecimientos que jalonan su curso. ¿Cómo se puede distinguir el hombre de ciencia moderno de un mago o de un adivino o, incluso más allá de las sociedades humanas, de la bacteria que interroga también al mundo y que no cesa de poner a prueba el reconocimiento de las señales químicas en función de las cuales se orienta? [2]. ¿Cómo caracterizar el diálogo que viene manteniendo a lo largo de tres siglos la ciencia moderna?

En pocas palabras, podríamos decir que el diálogo mantenido por la ciencia moderna vuelve a lanzar una empresa inmemorial, al mismo tiempo que emprende una aventura nueva. Nos explicaremos sobre este punto; digamos que en la actualidad seguimos a Alexandre Koyré cuando él anticipa que es el *diálogo experimental* el que constituye realmente lo que se llama ciencia moderna.

El diálogo experimental implica dos dimensiones constitutivas de la relación hombre-naturaleza: *comprensión y transformación*. La experimentación no entraña únicamente la escrupulosa observación de hechos tal como ocurren, ni tampoco la mera búsqueda de conexiones empíricas entre fenómenos, sino que exige una interacción entre conceptos teóricos y observación, lo cual implica desarrollar toda una estrategia. Un proceso natural se investiga como posible llave de una hipótesis teórica; y como tal se le prepara, purifica, antes de interrogarle en el lenguaje de esa teoría. Es éste un empeño sistemático que se reduce a provocar a la naturaleza, a definirse sin ambigüedad sobre si obedece o no a una teoría.

---

[2] Sobre el movimiento de las bacterias, léase Adler J., «The Sensing of Chemicals by bacteria», en *Scientific American*, abril 1976, pp. 40-47.

Los científicos han expresado de muy diversas formas su asombro cuando, haciéndose la pregunta, tienen la buena suerte de descubrir cómo se ajustan las piezas del rompecabezas y la incoherencia hace sitio a la lógica. Todos conocemos relatos de este tipo acerca de tal descubrimiento célebre, pero todo investigador ha conocido esta experiencia, sea cual sea la importancia de su hallazgo. En este sentido, se puede describir la ciencia como un juego entre dos participantes, en donde tenemos que adivinar el comportamiento de una realidad sin relación con nuestras creencias, nuestras ambiciones o nuestras esperanzas. No puede forzarse a la naturaleza a decir lo que nosotros queramos. La investigación científica no es un monólogo, porque el «objeto» interrogado no carece de medios para desmentir la hipótesis más plausible y más seductora, en pocas palabras, porque el juego comporta un riesgo que lo hace singular e intensamente emocionante.

Pero la singularidad de la ciencia occidental está lejos de agotarse en semejantes consideraciones metodológicas. Incluso Karl Popper, cuando discutía la descripción dogmática de la racionalidad científica, se vio forzado a admitir que, en un análisis final, la ciencia racional debe su existencia a su mismo éxito; el método científico es solamente aplicable en virtud de los increíbles puntos de acuerdo que revela entre nuestras hipótesis teóricas y los resultados experimentales [3]. La ciencia es un juego arriesgado, pero parece haber descubierto preguntas a las cuales la naturaleza proporciona respuestas consistentes. Este éxito de la ciencia occidental es un hecho histórico, no predecible *a priori*, pero que no puede esquivarse una vez ha acontecido, desde el momento en que, en el seno de una cultura dada, este tipo de pregunta ha desempeñado el papel de clave para el desciframiento. Desde que se llegó a este punto, hemos asistido a una transformación irreversible de nuestra relación con la naturaleza gracias a los éxitos de la ciencia moderna. En este sentido, se puede hablar de *revolución científica*.

La historia de la humanidad se ha visto marcada por otras situaciones peculiares, por otras «conjunciones de circunstancias» que llevan a cambios irreversibles, lo que Monod llamaba una *selección:* orientación no necesaria, al parecer, antes de que tenga lugar, pero que sin embargo conlleva una transformación inexorable del mundo

[3] Popper, K., *Objective Knowledge*, Oxford, Clarendon Press, 1972; trad. fr.: *La Connaissance objective*, Bruselas, Complexe, 1978.

en el que ocurre [4]. Uno de estos acontecimientos singulares es la llamada *revolución neolítica*. En el caso de la revolución científica, nos es dado vivir episodios decisivos y también poder estudiar su génesis. La historia de la inserción «mundana» de las actividades científicas y técnicas constituye, en este sentido, el ejemplo mejor documentado de uno de los procesos que determinan la evolución biológica y social: el nacimiento y desarrollo de una transformación con la mezcla de azar y necesidad que le da su atractivo histórico.

A continuación volvamos a las cuestiones sobre las cuales se ha abierto nuestra introducción. ¿Cómo podemos caracterizar esta orientación, esta «selección» a la que se ha llamado «revolución científica»? Hemos intentado hacer hincapié en algunas de sus propiedades, siempre situándola en el conjunto de prácticas cognitivas, que incluye el caso de la bacteria y su exploración del medio químico. Consideramos los principales logros de la dinámica clásica (capítulo I) como un hecho más que como un derecho basado en una racionalidad totalmente nueva. Otros han adoptado otro procedimiento: han visto en el nacimiento de la ciencia moderna el advenimiento de una cultura nueva, carente de medida común con lo que la ha precedido y le sirve de entorno —arte, ética, política—. Pero, cualquiera que sea la interpretación que se quiera darle, tiene por objeto los mismos «logros», los cuales son en cierto modo paradójicos, como ya hemos visto: la ciencia, en sus comienzos, ha planteado con acierto cuestiones que implican una naturaleza muerta y pasiva; el hombre del siglo XVII no consiguió comunicarse con la naturaleza más que para descubrir la aterradora estupidez de su interlocutor. Muchos se han creído forzados a asumir esta paradoja. Viendo en los primeros éxitos de la ciencia moderna el premio que corona una trayectoria por fin racional, vieron la soledad «descubierta» por la ciencia como el precio a pagar por esta racionalidad. La ciencia moderna, interpretada desde el punto de vista de estos primeros logros, es decir, *la ciencia clásica*, parecía imponer una elección entre la visión del hombre profundamente extraño al mundo y el rechazo de un solo modo fructífero de diálogo con la naturaleza.

[4] Monod, J., *op. cit.*, pp. 141-43. Más tarde se verá en qué medida esta descripción de Monod puede entrar en consonancia con las ideas de inestabilidad y bifurcación. Señalemos que no sólo se trata de ciertas metáforas. Es importante no enfatizar con las ideas prematuras de una «autoridad» científica poco relevante lo que, quizás un día, se convierta en una cuestión precisa.

Este era un difícil dilema. La ciencia moderna horrorizó tanto a sus oponentes, quienes veían en ella una empresa inaceptable y amenazante, como a sus defensores, que se comprometieron en una investigación tan heroica que para asumirla se hizo necesaria una decisión trágica. Creemos que este dilema es solidario con las convicciones ilusorias y los rechazos de la ciencia clásica, y el objeto de este libro no es otro que el de contribuir a poner fin a esa ilusión.

La ciencia moderna empezó por *negar* los conceptos antiguos y la legitimidad de las preguntas planteadas por el hombre acerca de su relación con la naturaleza. Adoptó el diálogo experimental, pero a partir de una serie de presupuestos y afirmaciones dogmáticas que dedican los resultados de esta interrogación (y sobre todo la «imagen del mundo» que los acompaña) a plantearse como inaceptables para los demás universos culturales, incluido el que los ha producido. La ciencia moderna está constituida como producto de una cultura, en contra de ciertas ideas dominantes en dicha cultura (en particular el aristotelismo, pero también la magia y la alquimia). Incluso podría decirse que está constituida en contra de la naturaleza, puesto que niega la complejidad y el devenir, alegando un mundo eterno y conocible regido por un pequeño número de leyes sencillas e inmutables.

Esta imagen de una «naturaleza autómata», cuyo comportamiento estaría regido por leyes accesibles para el hombre con los medios limitados de la mecánica racional, constituía ciertamente una apuesta audaz. Suscitó un entusiasmo y un rechazo apasionados. También estableció, hecho ahora ineludible, que las leyes matemáticas pueden, efectivamente, ser descubiertas. La ciencia newtoniana descubrió una ley universal, a la cual obedecen los cuerpos celestes y el mundo sublunar. Es la misma ley que hace que las piedras caigan al suelo y que los planetas giren alrededor del sol. Este primer acierto no ha sido desmentido desde entonces. Gran número de fenómenos obedecen a leyes sencillas y matematizables. Pero desde entonces, la ciencia parecía *demostrar* que la naturaleza no es más que un sumiso autómata. Lo que era una hipótesis fascinante y temeraria se había convertido en la «triste» verdad. Desde aquel momento, cada nuevo logro de la ciencia no haría sino reforzar la angustia y el sentimiento de alienación de quienes le han otorgado su confianza e intentan formar, basándose en ella, una imagen coherente de la naturaleza. La ciencia parecía sacar como conclusión la estupidez de la naturaleza.

Pero la ciencia de hoy no es ya la «ciencia clásica». Los conceptos fundamentales en los que se basa la «imagen clásica del mundo»

se han visto limitados hoy día por un progreso teórico que no hemos dudado en calificar de metamorfosis. La ambición de reducir el conjunto de procesos naturales a un pequeño número de leyes ha sido totalmente abandonada. Actualmente, las ciencias de la naturaleza describen un universo fragmentado, rico en diferencias cualitativas y en potenciales sorpresas. Hemos descubierto que el diálogo racional con la naturaleza no significa ya una decepcionante observación de un mundo lunar, sino la exploración, siempre electiva y local, de una naturaleza compleja y múltiple.

Ciencia y «desencanto del mundo» no son sinónimos. Desde esta perspectiva, podemos volver a interpretar los éxitos de la ciencia clásica, mostrar cómo han reforzado y confirmado las *particularidades culturales* de esta ciencia en sus comienzos, hasta parecer que las imponen como exigencias de una racionalidad universal.

¿Cómo podríamos describir mejor esta «metamorfosis»? Para empezar, conviene señalar hasta qué punto se ha modificado el objeto de las ciencias de la naturaleza. El tiempo no es ya el centro de atención de los fenómenos inmutables; no son ya las situaciones estables y las permanencias lo que más nos interesa, sino las evoluciones, las crisis y las inestabilidades. Ya no queremos estudiar solamente lo que permanece, sino también lo que se transforma, los trastornos geológicos y climáticos, la evolución de las especies, la génesis y las mutaciones de las normas que intervienen en los comportamientos sociales.

Podemos decir que está naciendo un nuevo naturalismo: las sociedades industriales buscan comprenderse mejor a sí mismas, interrogando los conocimientos y prácticas de las sociedades primitivas, estudiando los problemas de la evolución del animal al hombre, observando las sociedades animales. La biología molecular ha hecho una aportación fundamental al descubrimeinto del hombre como un ser que pertenece a la naturaleza, al mostrar, entre otros hechos sorprendentes, la universalidad del código genético.

Pero esta transformación tan sólo supone una renovación actual de la ciencia, insuficiente en sí misma para provocar una metamorfosis. Debemos comenzar señalando que las preocupaciones que acabamos de mencionar no han estado nunca totalmente ausentes, si bien lo han estado bajo diversas formas. Por otra parte, no se puede ignorar el peso cultural y teórico de los conceptos que sustentan la ciencia que llamamos clásica. A este respecto, las conclusiones de Jacques Monod nos proporcionan un ejemplo elocuente; el descubrimiento

de ciertos mecanismos determinantes de las funciones celulares, la descripción de su lógica, la hipótesis sobre los procesos evolutivos que han dado lugar a ellos, puesto que Monod los sitúa en el marco de la imagen clásica del mundo, le llevan a la idea de la soledad del hombre en un mundo que le resulta extraño.

Hemos dicho que pocos acontecimientos han sido tan anunciados en la historia de la ciencia como el fin del concepto mecanicista del mundo, lo que implica que pocas resurrecciones se han repetido tanto como la del ave Fénix mecanicista. Y en efecto, tanto en el pasado como en la actualidad, los conceptos clásicos han contribuido a definir el objeto y significado de las innovaciones teóricas, han sido el centro de las discusiones sobre la naturaleza y los límites de los diversos métodos de descripción; y han resurgido, con toda inocencia, en el corazón de las teorías que, como la mecánica cuántica, se suponía ya superadas.

El peso cultural de los conceptos clásicos supone un riesgo. Ya hemos dicho que la imagen del mundo que proporciona la ciencia clásica parece obligarnos a escoger entre la aceptación de las conclusiones alienantes que parecían impuestas por la ciencia y el rechazo de la trayectoria científica.

Por lo tanto, la ciencia clásica se caracteriza por una inserción inestable dentro de la sociedad; puede provocar entusiasmo y una afirmación heroica de las duras implicaciones de la racionalidad, pero también rechazo, incluso reacciones irracionalistas.

Volveremos más tarde sobre los movimientos anti-ciencia de hoy día. Tomemos un ejemplo previo: el movimiento irracionalista en la Alemania de los «años veinte» que formó el trasfondo cultural de la mecánica cuántica [5]. En oposición a la ciencia identificable con un conjunto de conceptos como causalidad, legalidad, determinismo, mecanicismo y racionalidad, hubo un violento surgimiento de ideas denegadas por la ciencia que iban a ser contempladas en esa época como la encarnación de la fundamental irracionalidad de la naturaleza. La vida, el destino, la libertad, la espontaneidad se transformaron en manifestaciones de un oscuro mundo subterráneo impenetrable a la razón. Sin adentrarnos en el peculiar contexto sociopolítico al cual debía su naturaleza vehemente y a gran escala, este rechazo de la cien-

[5] Forman, P., «Weimar Culture, Causality and Quantum Theory, 1918-1927; Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment», en *Historical Studies in Physical Sciences*, vol. 3, 1971, pp. 1-115.

cia racional ilustra los riesgos asociados a la ciencia clásica. Despreciando lo que, en nombre de la libertad, del destino y de la espontaneidad está relacionado con un conjunto de experiencias que los hombres creían ser significativas, la ciencia corre el riesgo de transferir estos conceptos al reino de lo irracional, dándoles, por consiguiente, un formidable poder.

Acabamos de hablar de libertad y actividad espontánea; volveremos sobre estos temas a lo largo de este libro; se tratará de demostrar por qué la ciencia clásica no podía sino mostrarse indiferente a las cuestiones que se planteaban. Mostraremos cómo reaparecieron estos temas en ciertas teorías físicas, ahora *enlazados* con los temas de la legalidad, el determinismo y la causalidad, lo cual es, sin duda, símbolo de lo que entendemos por metamorfosis de la ciencia: el nacimiento de un nuevo espacio teórico *en el cual* se inscriben ciertas oposiciones que antes definían las *fronteras* de la ciencia clásica. Espacio en el que se afirman diferencias intrínsecas entre objetos físicos y ante todo entre sistemas conservativos y sistemas disipativos. Evidentemente, no se trata de pretender que la ciencia sea ahora capaz de decidir lo que corresponde a la libertad del hombre, pero la idea de una naturaleza determinista y estéril ha salido ganando en ciertos conceptos que se han formado en nuestra sociedad a propósito de dicha libertad.

¿Cuáles son las hipótesis de la ciencia clásica de las cuales la ciencia actual se ha liberado? Fundamentalmente aquellas que se centran alrededor de la convicción básica de que el *mundo microscópico es simple* y está gobernado por leyes matemáticas simples, lo cual significa que la labor de la ciencia consiste en superar las apariencias complejas y reducir los diversos procesos naturales a un conjunto de efectos de dichas leyes. Este concepto de los objetos científicos conlleva una discriminación entre lo que en la naturaleza se supone corresponde a una realidad «objetiva» y lo que se considera ilusorio, ligado a nuestra propia subjetividad. De hecho, las leyes matemáticas simples a las cuales, según se cree, están sujetos los comportamientos elementales y que constituirían la verdad última del Universo, casi siempre han sido concebidas sobre el modelo general de las leyes dinámicas. Ahora bien, como veremos, estas leyes describen el mundo en términos de trayectorias deterministas y reversibles. Desde ese momento, no se niega solamente la libertad o la posibilidad de innovación, sino también la idea de que ciertos procesos, como la combustión de una vela o el envejecimiento de un animal, son intrínsecamen-

te irreversibles. Que lo que se hace no pueda ser siempre deshecho, que la vela no puede «desquemarse» o el animal rejuvenecer, no serían más que verdades relativas, dictadas por las limitaciones de los medios con que contamos y no por las «leyes objetivas» que rigen el mundo eterno y conservador.

Hace ya cincuenta años, desde la aparición de la mecánica cuántica, la idea de la simplicidad de lo microscópico se había vuelto insostenible. Sabíamos que sólo teníamos acceso a los átomos y a las moléculas utilizando como intermediarios nuestros instrumentos, que son macroscópicos, y que nuestras teorías al respecto están determinadas intrínsecamente por dicha mediación. Sin embargo, en el contexto de la mecánica cuántica, dicho conocimiento era inexistente. Esto ha dejado de ser verdad hoy día. Hemos descubierto que la irreversibilidad juega un papel esencial en la naturaleza y se encuentra en el origen de muchos procesos de organización espontánea. La ciencia de los procesos irreversibles ha rehabilitado en el seno de la física la idea de una naturaleza creadora de estructuras activas y proliferantes. Por otra parte, ahora sabemos que tanto en la dinámica clásica o en lo que concierne al movimiento planetario, ha muerto el mítico diablillo omnisciente al que se suponía capaz de adivinar el pasado y el futuro a partir de una descripción instantánea. Nos encontramos en un mundo indiscutiblemente aleatorio, en un mundo en el que la reversibilidad y el determinismo son casos particulares y en el que la irreversibilidad y la indeterminación microscópicas son la regla.

Nuestro libro trata de esta metamorfosis de la cienca desde la Epoca de Oro de la ciencia clásica hasta el presente. No es, por tanto, ni una enciclopedia ni un libro de divulgación. No se mencionarán más que muy poco o nada las fascinantes aplicaciones teóricas como la astrofísica o la ciencia de las partículas elementales; sólo mencionaremos de pasada la relatividad. Pensaremos en algunas ideas generales, aquellas que amparó la ciencia y aquellas que ahora rechaza. Así, nuestro propósito es el de examinar el significado de tres siglos de progreso científico desde un punto de vista preciso que nos debería permitir comprender cómo la ciencia, originalmente parte integrante de la «cultura clásica», fue abriéndose gradualmente a lo largo de un proceso histórico complejo, hasta poder hoy día incorporar cuestiones de muy distinto origen.

Hemos dedicado mucho espacio, quizá demasiado, a ciertos aspectos teóricos que nos son familiares. No se trata solamente de un problema de perspectiva, sino de un caso de aplicación de una de

nuestras tesis centrales, según la cual los problemas que marcan una cultura pueden influir en el contenido y el desarrollo de las teorías científicas. Esta tesis se relaciona con uno de nosotros en su experiencia personal. El problema al que intentó responder a lo largo de su carrera científica, el problema del tiempo en su relación con la complejidad de la naturaleza, fue suscitado por una exigencia propiamente cultural, que Bergson expresaba cuando escribía: «El tiempo es invención o no es nada.» Los nuevos progresos que tendremos ocasión de recordar (capítulos VI y IX) constituyen en este sentido la respuesta a una cuestión cuya urgencia, suscitada por el contexto cultural, encontró los medios teóricos y técnicos necesarios para dar fruto. Bergson exploró los *límites* de la ciencia clásica. Las respuestas, o principios de respuestas, que presentaremos aquí, nos han llevado *más allá* de los límites de la ciencia clásica. Bergson subrayó que desde las primeras teorías mecánicas hasta la relatividad de Einstein (y nosotros podemos añadir: hasta la mecánica cuántica), tiempo y espacio, tiempo y movimiento se encontraban tan estrechamente ligados entre sí que casi se confundían.

Ahora bien, hoy asistimos a un *redescubrimiento* del tiempo físico y pensamos que tal redescubrimiento no resulta de la simple lógica interna de las teorías científicas, sino de cuestiones que se hubo de *decidir* si seguirían planteándose o si podrían ser olvidadas por una física que intenta comprender la naturaleza.

Hemos dedicado mucho espacio a la dinámica clásica. En realidad, desde nuestro punto de vista, éste es el mejor punto de observación desde el cual podemos contemplar la actual transformación de la ciencia. La mecánica cuántica, que es nuestra actual teoría de los comportamientos microscópicos, ha planteado muchos nuevos problemas ignorados por la dinámica clásica. Retiene, sin embargo, un cierto número de posturas conceptuales de la dinámica clásica, particularmente en lo que concierne al tiempo y al devenir. Por otra parte, las teorías recientes que expondremos al final de este libro se aplican tanto a la dinámica clásica como a la mecánica cuántica.

Puede que a ellas se deba principalmente la diferencia entre nuestro libro y una obra de divulgación. En efecto, se trata de teorías en plena evolución y algunos de sus resultados están aún en vías de ser publicados.

No es nuestra intención el ilustrar las adquisiciones definitivas de la ciencia, el ilustrar sus resultados estables y bien establecidos. Tampoco trataremos de guiar al lector a través del impresionante edificio

de una ciencia cristalizada y triunfante. Lo que queremos destacar es simplemente la creatividad conceptual de la actividad científica, sus perspectivas de futuro y los nuevos problemas que plantea. De cualquier manera, sabemos que estamos sólo al principio de nuestra exploración; no se encontrarán síntesis teóricas universales justo después de un gran descubrimiento en cualquiera de los campos de la física. No vislumbraremos un final a la incertidumbre o al riesgo.

Por tanto, no tenemos ninguna razón para esperar; el mañana no nos traerá más seguridad que la que tenemos hoy. Hemos escogido presentar las cosas en su estado actual, aun sabiendo cuán incompletas son nuestras respuestas y cuán imprevisibles los problemas que suscitarán nuestras actuales teorías. El fin nos pareció lo bastante importante para justificar dicha elección.

Permítasenos una última observación: alguien podría sacar de lo que sigue a continuación la impresión de una cierta «sobrecarga», como si algunos temas abordados no fueran necesarios para nuestro objetivo. Y, en efecto, no hemos pretendido dar a nuestro estudio la nitidez de un esquema. En la actualidad no existe un modo canónico de abordar el problema de la ciencia. Solamente conocemos el precio inaceptable que han tenido que pagar quienes han intentado «purificar» el tema, olvidando que la descripción de la actividad científica no puede separarse sin conflicto de la descripción del mundo al que pertenece. Por esta razón hemos querido que este estudio diera la impresión, no de desorden, sino de apertura; hemos querido señalar de pasada algunos de los problemas planteados, incluso aun cuando no pudiéramos hacerles justicia. Hemos pretendido que este libro lleve el estigma de las múltiples formas de operar de que disponemos, manifestando de este modo la necesidad de una reflexión más completa sobre la ciencia dentro de la sociedad.

Nuestro libro se divide en tres partes. La primera estudia la brillante historia de la ciencia clásica y las consecuencias culturales de su éxito. Acabamos de esbozar la descripción de las teorías y de los conceptos que se impusieron.

Veremos cómo la ciencia fue acogida con entusiasmo tanto por los resultados que ya había conseguido como por la posibilidad de nuevos desarrollos; veremos entonces cómo la desesperación, la ansiedad y la hostilidad sustituyeron a la glorificación del progreso humano. Describiremos la polarización cultural que aconteció como un resultado del problema planteado por la *existencia* misma de la ciencia clásica y de su impresionante éxito. ¿Debe este éxito aceptarse

como tal, quizá limitando sus implicaciones, o debe el propio método científico rechazarse como parcial o ilusorio? Ambas posibilidades llevan al mismo resultado: el enfrentamiento entre lo que se ha venido a llamar las «dos culturas»: las humanidades y la ciencia.

Y, sin embargo, ya a principios del siglo XIX, cuando precisamente estaba triunfando la ciencia, cuando el programa newtoniano dominaba la ciencia francesa y ésta última dominaba a Europa, apareció la primera amenaza a la construcción newtoniana. En la segunda parte de nuestro estudio seguiremos el desarrollo del rival de la ciencia de la gravitación de Newton, i.e. la ciencia del calor, empezando con el primer desafío lanzado por Fourier al formular la ley que gobierna la propagación del calor. El curso de la historia mostraría que dicho desafío era más serio de lo que habría sido la formulación de una ley que fuera simplemente ajena a la ciencia newtoniana del movimiento; era de hecho la primera descripción matemática de algo inconcebible en dinámica, i.e. un proceso irreversible.

Los dos primeros descendientes de la ciencia del calor, la ciencia de la conversión de energía y la ciencia de las máquinas térmicas —todavía concebidas sobre el modelo clásico—, dieron lugar a la primera ciencia no clásica, la termodinámica, de la cual a menudo se dice que introdujo la «flecha del tiempo» en física [6]. Seguiremos la evolución de la termodinámica hasta hoy, hasta el descubrimiento de los procesos de organización espontánea y de las *estructuras disipativas* cuya génesis implica la asociación indisoluble del azar y la necesidad. La física retoma ahora lo que la ciencia clásica negaba basándose en la reversibilidad de los comportamientos elementales, esto es, los conceptos de estructura, función e historia.

Desde entonces, el enfrentamiento de estas dos teorías desde finales del siglo XIX, es ya inaceptable. No se puede aceptar ya ninguna solución que haga de la irreversibilidad una ilusión o el resultado de una descripción aproximada. La irreversibilidad es fuente de orden, de organización. Dos ciencias para un solo mundo, constituye el tema de la tercera parte del libro, la más técnica. Gracias a la renovación conceptual y tecnológica de la física de este siglo, que ha generado la relatividad y, sobre todo, la mecánica cuántica, junto con los conceptos de operador y complementariedad, sin olvidar el avance, menos conocido, de las propias teorías dinámicas clásicas, hemos

[6] Véase, por ejemplo, los notables escritos de Arthur Eddington en *The Nature of the Physical World*, Ann Arbor Paperbacks, Michigan Press, 1958, pp. 68-80.

podido acercarnos a un abismo aparentemente infranqueable. Hemos procurado reducir la dimensión técnica de este estudio, necesaria para introducir los conceptos nuevos en un lenguaje preciso que evite toda ambigüedad. El lector con prisa encontrará en la conclusión un comentario no técnico de dicha renovación conceptual.

La ciencia clásica no imponía, sino que permitía ciertas ilusiones, que hoy quedan excluidas. En particular, hoy no tenemos derecho a afirmar que el único fin digno de la ciencia es el descubrimiento del mundo desde un punto de vista exterior al que sólo podría tener acceso uno de esos diablillos presentes en los postulados de la ciencia clásica. Como veremos más adelante, nuestras teorías más fundamentales se definen ahora como obra de seres inscritos en el mundo explorado por ellos. En este sentido, la ciencia ha abandonado toda ilusión de «extra-territoriedad» teórica [7] y no se pueden autorizar ya pretensiones de esta índole más que a título de tradiciones y esperanzas. Pero nosotros creemos que la ciencia debe renunciar a otro tipo de extra-territoriedad, la de tipo cultural. Es urgente que la ciencia se reconozca como parte integrante de la cultura en la que se desarrolla.

Erwin Schrödinger escribió una vez, para gran indignación de muchos filósofos de la ciencia, que: «...Hay una tendencia a olvidar que toda ciencia está en estrecha relación con la cultura humana en general y que los descubrimientos científicos, incluso aquellos que en el momento parecen los más avanzados, esotéricos y difíciles de comprender, no tienen sentido fuera de su concepto cultural. Una ciencia teórica no consciente de que aquellas de sus construcciones consideradas relevantes y transcendentes están eventualmente destinadas a ser enmarcadas en conceptos y palabras, que tienen sentido para una comunidad educada y de convertirse en parte y parcela de una imagen general del mundo; una ciencia teórica, vuelvo a insistir, que olvida esto y en donde los iniciados continúan cavilando en términos sólo entendidos por algunos compañeros de viaje, estará necesariamente aislada del resto de la humanidad cultural; está avocada a la atrofia y a la osificación» [8].

[7] Esta expresión fue empleada por Serge Moscovici, y constituye el tema central de lo que enuncia bajo el nombre de «revolución kepleriana» de las ciencias en «Quelle unité de l'homme?», en *Hommes domestiques et hommes sauvages*, París, Christian Bourgois, 10-18, 1974.

[8] Schrödinger, E., artículo publicado en *The British Journal for the Philosophy of*

Uno de los temas esenciales de este libro es el de una fuerte interacción entre los puntos propios a una cultura considerada como un todo y los desarrollos conceptuales en la ciencia dentro del marco de esta cultura. En el mismo corazón de la ciencia encontramos problemas como el tiempo, el devenir, la irreversibilidad, a los cuales cada generación de filósofos y científicos ha tratado de dar una nueva respuesta. Esperamos aportar así algunos elementos a la reflexión sobre la interacción entre ciencia y cultura que reconozca a un tiempo la importancia de las inquietudes culturales, tanto en los conceptos como en las interpretaciones de las teorías y del carácter específico de las obligaciones teóricas y técnicas que determinan la fecundidad histórica efectiva de dichas inquietudes.

Algunos filósofos han definido el progreso de la ciencia en términos de ruptura, de separación o de negación, de un alejamiento de la experiencia concreta hacia una abstracción cada vez más difícil de comprender. Según nuestra interpretación, definen sin más lo que fue la situación histórica de la ciencia clásica, la cual negaba las cuestiones más «evidentes» suscitadas por la experiencia de las relaciones entre el hombre y su entorno, simplemente porque era incapaz de encontrar un sitio para ellas. Pero esta «traducción» filosófica, en la medida en que *justificaba* una situación *real,* ayudó a disimular lo que nosotros queremos describir: las cuestiones negadas no desaparecieron después de haber sido declaradas ilegítimas, sino que su insistencia ha provocado la inestabilidad del desarrollo científico y lo ha hecho vulnerable a problemas menores a primera vista.

Gracias a las cuestiones negadas por la ciencia clásica, la ciencia actual ha sido capaz de experimentar una metamorfosis progresiva.

Existe sin lugar a dudas un desarrollo abstracto de las teorías científicas —tendremos ocasión más adelante de hablar de la purificación gradual del lenguaje de la dinámica—. Sin embargo, las innovaciones conceptuales que han sido decisivas para el desarrollo de la ciencia no son necesariamente de este tipo. Surgen a menudo de la incorporación exitosa de alguna nueva dimensión de la realidad. Por ejemplo, la introducción del concepto de irreversibilidad o de inestabilidad. En ambos casos (y podemos generalizar esta observación), la innovación proporciona una excelente demostración de la influencia

---

Science, vol. 3, pp. 109-110, 1952, y citado con indignación por P. W. Bridgmann en su contribución a *Determinism and Freedom in the Age of Modern Science,* ed. Hook, S., Nueva York, University Press, 1958.

ejercida por el contexto cultural e incluso el «ideológico» y, por tanto, de la real receptividad de la ciencia al entorno en el cual se ha desarrollado.

Afirmar esta receptividad es ir en contra de otra concepción tradicional en lo que concierne a la ciencia: la idea de que ésta se desarrolla por medio de su liberación de las formas tradicionales de comprensión de la naturaleza (de que se purifica de lo que se definen como prejuicios surgidos del perezoso sentido común, de manera a contrastarlos mejor con el «ascesis» de la razón). Esto, a su vez, lleva a la conclusión de que la ciencia debería ser la ocupación de comunidades de hombres que viven al margen de materias mundanas. La comunidad científica ideal debería por tanto verse protegida de las presiones, necesidades y exigencias de la sociedad. El progreso científico debería ser un proceso esencialmente independiente, al cual perturbarían o retrasarían todas las influencias «externas», todo interés que surgiera de la participación del científico en otras actividades culturales, sociales o económicas.

Este ideal de abstracción, de la retirada del científico, encuentra un aliado en otro ideal, sobre el que debería especificarse la vocación de un «verdadero» investigador, a saber, su deseo de escapar de las vicisitudes mundanas. Einstein describe el tipo de científico contemplado con buenos ojos por el «Angel del Señor», *en el caso en el* que a este último le fuese asignada la tarea de expulsar del «Templo de la Ciencia» a todos aquellos que son «indignos» —no se menciona en qué sentido—. Son esencialmente individuos extraños, poco comunicativos, solitarios, quienes a pesar de estas características comunes se parecen el uno al otro menos que los de la multitud de expulsados entre sí.

¿Qué es lo que los llevó al Templo...? Uno de los más fuertes motivos que llevan a los hombres al arte y la ciencia es la huida de la vida diaria con su dolorosa dureza y su miserable tristeza y de las ataduras de sus cambiantes deseos. Alguien que esté forjado de manera más delicada se ve forzado a escapar de la existencia personal hacia el mundo de la observación y comprensión objetivas. Esta motivación puede compararse con la añoranza que irresistiblemente empuja al ciudadano a abandonar su ruidosa y estrecha vivienda por las altas y silenciosas montañas, en donde el ojo mira libremente a través del aire puro y sereno y traza los pacíficos contornos que parecen estar hechos para la eternidad.

A esta motivación negativa se asocia otra positiva. El hombre bus-

ca el formarse, del modo que le es más conveniente, una imagen simplificada y lúcida del mundo y así vencer al mundo de la experiencia dándose prisa en sustituirlo en cierta medida por su propia imagen [9].

La incompatibilidad, tan intensamente sentida por Einstein, entre la belleza ascética que busca la ciencia y el mezquino remolino de la experiencia mundana, puede ser reforzada por otra incompatibilidad, esta vez abiertamente maniquea, entre ciencia y sociedad y, más precisamente, entre la libre creatividad humana y el poder político. En este caso ya no es en una comunidad aislada o en un templo, sino en una fortaleza o en una casa de locos, tal como Duerrenmatt imaginó en su obra «Los físicos», que la investigación debería ser llevada a cabo. Los tres personajes centrales de la obra de Duerrenmatt son tres físicos que discuten los medios y arbitrios de avanzar en física, salvaguardando a la humanidad de las lamentables consecuencias de la apropiación por los poderes políticos de los resultados de su progreso. Llegan a la conclusión de que el único camino posible es el escogido por uno de ellos. Deciden los tres pretender estar locos y esconderse en un asilo de lunáticos. Al final de la obra, tal como si el destino lo quisiera, descubren que su último refugio es una ilusión. La mujer que dirige el asilo los espía, sustrayendo sus resultados y alzándose con el poder mundial.

La obra de Duerrenmatt nos lleva finalmente a una tercera concepción de la actividad científica; la ciencia progresa reduciendo la complejidad de la realidad a una simplicidad legal ocultada. Lo que el físico Moebius está tratando de ocultar en el seno de una casa de locos es el hecho de que ha resuelto con éxito el problema de la gravitación, ha descubierto una teoría unificada de partículas elementales y, por fin, el Principio de Descubrimiento Universal, fuente de poder absoluto. Queda claro que Duerrenmatt utiliza una exageración para defender su tesis, aunque se piensa comúnmente que lo que se busca en el templo de la ciencia no es otra cosa que la «fórmula» del universo. El hombre de ciencia, además de ser retratado como un asceta, se convierte ahora en un cierto tipo de mago, en un hombre aparte, en el potencial poseedor de la llave universal de todos los fenómenos físicos y, por tanto, imbuido de un conocimiento todo-po-

[9] Einstein, A., «Prinzipien der Forschung, Rede zu 60. Geburtstag von Max Planck» (1918), en *Mein Wetbild,* Ullstein Verlag, 1977, pp. 107-110, trad. fr.: «Les principes de la recherche cientifique», en *Comment je vois le monde,* París, Flammarion, 1958, pp. 139-140.

deroso. Esto nos devuelve a un tema que ya hemos mencionado: es sólo en un mundo simple (y especialmente en el mundo de la ciencia clásica, cuya complejidad es sólo aparente) donde toda forma de conocimiento puede proporcionar una llave universal [10].

Uno de los problemas de nuestra época es el del conjunto de conceptos que refuerzan el aislamiento de la comunidad científica. Es ya urgente estudiar las diversas modalidades de integración de la actividad científica en la sociedad que la dejen más o menos *finalizada* [11], que no resulte ajena a las necesidades y exigencias de la colectividad.

Acabamos de hablar de urgencia. De forma irreversible, el ser humano ha empezado a trastornar su medio natural una vez más, pero esta vez en una escala sin precedentes; y a través de ello, según escribe Moscovici [12], está naciendo una «nueva naturaleza».

El futuro depende ahora más que nunca de nosotros. Al poblar el mundo de nuevas generaciones de máquinas y de tecnologías, el hombre provoca una multitud de procesos imbricados sobre un fondo nuevo y para comprender el mundo cuya creación pretende determinar necesitará de todos los instrumentos conceptuales y tecnológicos que pueda proporcionarle la ciencia. Necesitará una ciencia que no sea un mero instrumento sujeto a prioridades externas, ni un cuerpo extraño que se desarrolle en el seno de un sustrato social y que carezca de finalidad. Nuestro estudio se encuentra, así, en un contexto de receptividad e incertidumbre.

Pecaríamos de ingenuidad si dijéramos que la metamorfosis teórica de la ciencia que vamos a describir bastará para resolver los problemas que acabamos de mencionar. Así como la ciencia occidental no puede ser juzgada como responsable de los problemas a los que

---

[10] Excepto volver al mundo de los magos; no carece de sentido decir que reaparece la idea del conocimiento secreto, a la cual se oponen las ciencias modernas, puesto que en física, como en biología, se puede obtener de la naturaleza efectos *desmesurados*. En oposición a magos y alquimistas, los científicos ingenieros de la época moderna negaron tal posibilidad, así como que la manipulación de la naturaleza pudiera producir otra cosa que efectos proporcionales a lo que nosotros llamamos acción casual.

[11] El término *finalización* fue introducido en la sociología alemana de las ciencias por el grupo de Stranberg. Véase, por ejemplo, Böhme, G.; Van Den Daele, W.; Krohn, W., «Die Finalisierung der Wissenschaft», en *Zeitschrift für Soziologie*, Jg. 1, Heft 2, 1973, pp. 128-144.

[12] Moscovici, S., *Essai sur l'histoire humaine de la nature*, París, Flammarion, «Champs», 1977.

nos enfrentamos hoy día, tampoco debe considerársela como fuente de salvación. Por tanto, creemos que es significativo que nuestras teorías sean hoy capaces de superar los límites y las hipótesis que parecían hacer que se mantuvieran para siempre las selecciones de una cultura revolucionada y que puedan abrirse a nuevos enfoques. El mundo finito de los tiempos futuros no permitirá que nuestra ciencia sea estrictamente occidental, más aún cuando las reacciones irracionalistas que se permitan «negativas» a la ciencia son más peligrosas que nunca. Por otra parte, conviene decir que la racionalidad científica a menudo ha servido para garantizar decisiones basadas en otras consideraciones. Una ciencia despojada de sus ilusiones podría ser menos dócil, más lúcida y más exigente, puesto que es una cuestión de «racionalidad científica».

Hace tiempo, el carácter absoluto de los enunciados científicos se consideraba como signo de racionalidad universal; la universalidad significaría en este caso negación y superación de toda particularidad cultural. Creemos que nuestra ciencia se abrirá a lo universal cuando cese de negar, de considerarse ajena a las inquietudes y a los interrogantes de las sociedades en las que se desarrolla; cuando sea capaz de mantener un diálogo con la naturaleza cuyos múltiples encantos sabrá entonces apreciar y con los hombres de todas las culturas, cuyas preguntas aprenderá a respetar.

La historia que vamos a narrar es también la historia de la naturaleza, de nuestro concepto de la misma y de nuestra relación material con ella, de los efectos que nosotros producimos y de los procesos que cultivamos sistemáticamente, al poblarla de máquinas. Conoceremos una naturaleza autómata, que el hombre describe tan extraña a él como un reloj a un relojero. En el siglo XIX veremos a la naturaleza mecánica transformarse en una naturaleza motora, con el nuevo y angustioso concepto del agotamiento de los recursos y la decadencia y con la perspectiva rival del progreso, precisamente el mismo que nos ha permitido pasar del reloj a la máquina térmica.

¿En dónde nos encontramos hoy día? Nos habría gustado titular este libro «El tiempo encontrado», porque la naturaleza a la que se dirige nuestra ciencia no es ya la que podía ser descrita por un tiempo invariable y repetitivo, ni tampoco aquélla cuya función monótona, creciente o decreciente, se resumía en la evolución. Exploramos ahora una naturaleza de evoluciones múltiples y divergentes que nos hace pensar no en un tiempo en detrimento de otros, sino en la coexistencia de tiempos indiscutiblemente diferentes y ligados entre sí.

Dos posturas enfrentadas. Newton, en sus *Principia:* «El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye libremente sin relación alguna con el exterior y recibe también el nombre de Duración.» Bergson, en *La evolución creadora:* «El Universo dura. Cuanto más profundicemos en la naturaleza del tiempo, más comprenderemos que duración significa invención, creación de formas, elaboración continua de lo absolutamente nuevo.» A partir de ahora, estas dos dimensiones se enlazan en lugar de excluirse. El tiempo hoy encontrado es también el tiempo que no habla más de soledad, sino de la alianza del hombre con la naturaleza que describe.

Libro primero

EL ESPEJISMO DE LO UNIVERSAL: LA CIENCIA CLASICA

Capítulo I
EL PROYECTO DE LA CIENCIA MODERNA

1. *El nuevo Moisés*

Nature and Nature's laws lay hid in night;
God said, let Newton be! and all was light [1].

A. Pope

(Proyecto de epitafio para Isaac Newton, muerto en 1727.)

El tono enfático de Pope no debe extrañarnos. A los ojos de la Inglaterra del siglo XVIII, Newton es el «Nuevo Moisés» a quien fueron mostradas las «tablas de la ley». Poetas, arquitectos, escultores y otros artistas concurren alrededor de proyectos de monumentos. Una nación se reúne para conmemorar el acontecimiento: un hombre ha descubierto el lenguaje que habla la naturaleza; y al cual obedece.

Nature, compelled, his piercing Mind obeys,
And gladly shows him all her secret Ways;
'Gainst Mathematicks she has no Defence,
And yields t' experimental Consequence [2].

[1] «La naturaleza y sus leyes yacían, escondidas en la noche. Dios dijo: ¡Que Newton sea! Y todo fue claridad.»

[2] «La naturaleza se somete a su mente inquisitiva, y con gusto le muestra sus vías

La moral y la política encuentran en el episodio newtoniano material para «fundamentar» sus argumentaciones. Así es como el reverendo Desaguliers traduce en el «Espíritu de las leyes» el sentido literal del nuevo orden: la monarquía constitucional es el mejor de los regímenes en tanto en cuanto el Rey ve, tal como el Sol, su poder limitado:

«Like Ministers attending ev'ry Glance
Six Worlds sweep round his Throne in Mystick Dance.
He turns their Motion from his Devious Course,
And bend their Orbits by Atractive Force;
His Pow'r coerc'd by Laws, still leave them free,
Directs, but not Destroys, their Liberty» [3].

El mismo Newton, aunque no se ha aventurado en el dominio de las Ciencias Morales, no ha dudado en sostener la universalidad en toda la física de las leyes expuestas en los *Principia*. La naturaleza es «muy conforme consigo misma», afirma en su famosa cuestión 31 de la *Optica*, y esta elipse vigorosa cubre una pretensión hiperbólica: combustión, fermentación, calor, cohesión, magnetismo...; no hay proceso natural que no sea producido por estas potencias activas, atracción y repulsión, que regulan el curso de los astros y la caída de los cuerpos.

Héroe nacional desde antes de su muerte, Newton llegará a ser, un siglo más tarde, notablemente bajo la influencia de la potente escuela de Laplace, el símbolo de la revolución científica europea. Los astrónomos han escrutado el cielo, en donde de ahora en adelante la matemática legisla y predice. Hecho absolutamente destacable, el sistema newtoniano ha triunfado sobre todos los obstáculos: mejor aún, dejaba la puerta abiera a desarrollos matemáticos que han permitido dar cuenta de desviaciones aparentes e incluso, en un caso célebre, de inferir a partir de éstas la presencia de un cuerpo celeste hasta enton-

secretas; no tiene defensa contra las matemáticas y se inclina ante la experimentación.» J. T. Desaguliers, *The Newtonian System of the World, the Best Model of Government: an Allegorical Poem*, 1728, citado por H. N. Fairchild en *Religious Trends in English Poetry*, vol. I, Nueva York, Columbia University Press, 1939, p. 357.

[3] «Como ministros atentos a cada una de sus miradas, seis mundos rodean su trono en una danza mística. Curva el curso divergente de sus movimientos y doblega sus órbitas con fuerzas atractivas; sus poderes, limitados por leyes, los deja sin embargo libres; dirige, pero no destruye, su libertad.» J. T. Desaguliers, *op. cit.*, p. 358.

ces desconocido. En este sentido podemos decir que el «invento» de un nuevo planeta, Neptuno, consagraba la potencia profética de la visión newtoniana, mientras que Laplace desplegaba su poder sistemático.

Al alborear el siglo XIX, el nombre de Newton tiende a reunir todo lo que, adquirido o prometido, tiene valor de modelo para las ciencias. Pero, curiosamente, el método recibe en esa época interpretaciones divergentes.

Algunos ven en él, ante todo, la idea de un protocolo de experiencia matematizable. Para ellos, la química ha tenido su Newton en Lavoisier, quien ha consagrado la utilización sistemática de la balanza y definido una química cuantitativa como el estudio de los balances invariantes de masa en el curso de las transformaciones de la materia.

Para otros, la estrategia newtoniana consiste, ante un conjunto de fenómenos, en aislar un hecho central, irreducible y específico del cual todo podrá ser deducido. Como en el caso de Newton, cuyo rasgo de ingenio, según esta interpretación, es precisamente el haber renunciado a explicar la fuerza de atracción, cada disciplina se dará como punto de partida un hecho de este tipo, inexplicable y base de toda explicación. Algunos médicos, desde entonces, se han sentido autorizados por Newton para arropar con un lenguaje moderno el discurso vitalista y hablar de una fuerza vital *sui generis*. Es este mismo papel el que llegaría a desempeñar en química la afinidad, fuerza de interacción específica, irreducible a las leyes del movimiento de masas.

Los «verdaderos newtonianos» se indignan y afirman la universalidad del poder explicativo de la gravitación. Pero es demasiado tarde. Es, desde entonces, newtoniano todo lo que trata de sistemas de leyes, todo lo que reactiva los mitos de la armonía en donde pueden comunicarse el orden natural, el orden moral, social y político. El éxito newtoniano reúne desde ese momento los proyectos más diversos. Algunos filósofos románticos de la naturaleza encuentran en el mundo newtoniano un universo encantado, animado por las fuerzas más diversas. Los físicos más «ortodoxos» ven en ello un mundo mecánico y matemático regulado por una fuerza universal. Para los positivistas es el éxito de una gestión.

El resto es literatura —a menudo newtoniana—: la armonía que reina en la sociedad de los astros, las antipatías y afinidades que producen la vida social de los compuestos químicos, todos estos proce-

sos ven sus efectos reproducidos, amplificados, en el universo así rejuvenecido de las sociedades humanas [4].

¿Qué hay de extraño en que se haya hablado de esta época como la edad de oro de la ciencia?

Todavía hoy, la ciencia newtoniana representa un éxito ejemplar. Los conceptos dinámicos que ha introducido constituyen una adquisición definitiva que ninguna transformación de la ciencia podrá ignorar. Sin embargo, la Edad de Oro de la ciencia clásica está, bien lo sabemos, acabada, y al mismo tiempo desaparece la idea de que la racionalidad newtoniana —cuyas diversas interpretaciones se enfrentan desde entonces abiertamente— puede bastar para unificar el conocimiento.

La historia que narra este libro es en primer lugar la del triunfo newtoniano: del descubrimiento, hasta nuestros días, de dominios siempre nuevos que prolongan el pensamiento newtoniano. Pero también es la historia de la puesta al día de los límites de esta ciencia, de las dificultades y de las dudas que ha suscitado y de las tentativas de paliar estas insuficiencias o de pensar en alguna otra ciencia. Podemos decir que desde hace cerca de ciento cincuenta años estamos a la búsqueda de una nueva concepción coherente de la empresa científica y de la naturaleza que describe la ciencia. Vamos a explicar aquí cómo esta nueva concepción surge del desarrollo reciente de la ciencia y constituye, hoy, la promesa, léase la realidad, de una metamorfosis de la ciencia.

---

[4] «Gerd Buchdahl subraya e ilustra la ambigüedad del modelo newtoniano, en su dimensión a la vez empirista *(Optica)* y sistemática *(Principia)* en *The Image of Newton and Locke in the Age of Reason*, Newman History and Philosophy of Sciences Series, Londres, Sheed Ward, 1961. En lo que concierne al uso metafórico de los conceptos newtonianos a principios del siglo XIX, recomendamos el bello libro de Judith Schlanger, *Les Métaphores de l'organisme* (París, Vrin, 1971), en especial pp. 36-45 y 99-108.

2. *El mundo desencantado*

«...May God us Keep
From Single Vision and Newton's Sleep!»

William Blake

(en una carta a Thomas Butts,
22 de noviembre de 1802) [5].

Hemos escogido, para ilustrar el carácter inestable de la síntesis científica cultural que realizó la ciencia newtoniana, aproximarnos a nuestra época a través de esta introducción al coloquio de la UNESCO consagrado a las relaciones entre la Ciencia y la Cultura: «Desde hace más de un siglo, el sector de la actividad científica ha conocido un crecimiento tal en el interior del medio ambiente cultural, que parece sustituir al conjunto de la cultura. Para algunos, no habría en esto más que una ilusión producida por la velocidad de este crecimiento, pero las líneas de fuerza de esta cultura no tardarían en surgir de nuevo para dominarla al servicio del hombre. Para otros, este triunfo reciente de la ciencia le confiere al fin el derecho de regentar el conjunto de la cultura, la cual, por otra parte, no merecería su título más que en tanto en cuanto se dejase difundir a través del aparato científico. Otros, por último, asustados por la manipulación a la cual el hombre y la sociedad se ven expuestos cayendo bajo el poder de la ciencia, ven perfilarse el espectro de la derrota cultural» [6].

La ciencia aparece en este texto como un cuerpo extraño en el interior de la cultura, un cuerpo cuyo crecimiento canceroso amenaza con destruir el conjunto de la vida cultural; la cuestión, de vida o de muerte, es la de dominar la ciencia, de dominar su desarrollo, o de dejarse esclavizar, destruir por ella. En más o menos ciento cincuenta años, la ciencia, de ser fuente de inspiración, se transformó en amenaza, y no solamente en amenaza para la vida cultural de los hombres, sino, más insidiosamente, en amenaza de destrucción de los conocimientos, de las tradiciones, de las esperanzas más enraizadas en la memoria cultural: no es tal o cual consecuencia tecnológica o resultado científico, sino el mismo «espíritu científico» el que se ve acusado.

---

[5] «...¡Que Dios nos guarde de ver con un solo ojo y de dormir con el sueño de Newton!»

[6] *La Science et la diversité des cultures,* UNESCO, París, P.U.F., 1974, pp. 15-16.

Se haga caer la responsabilidad en un escepticismo global oculto por la cultura científica o en las conclusiones concretas de las diversas teorías científicas, la afirmación está a la orden del día: la ciencia desencanta al mundo; todo lo que ella describe se encuentra, sin remedio, reducido a un caso de aplicación de leyes generales desprovistas de interés particular. Lo que para generaciones preservadas había constituido una fuente de alegría o de sorpresa, deja de manar cuando nos acercamos a ella.

Este supuesto efecto del progreso científico constituye, y hay que constatarlo, una tesis sostenida no solamente por los que critican la ciencia, sino por aquellos que la defienden y la glorifican. Hemos escogido como típica a este respecto la conclusión aportada por Jacques Monod en su análisis de las consecuencias filosóficas de la biología moderna: «Es muy necesario que el hombre despierte de su sueño milenario para descubrir su total soledad, su extrañeza radical. Ahora sabe que está al margen del universo en donde debe vivir. Universo sordo a su música, indiferente tanto a sus esperanzas como a sus sufrimientos y crímenes» [7].

La exhortación de Monod, que urge «al hombre» a asumir su destino de soledad y renunciar a las ilusiones donde se refugian las sociedades tradicionales, lleva a identificar de manera típica la ciencia occidental, tal como se ha desarrollado desde hace siglos, con una racionalidad que trasciende todas las culturas y todas las épocas. El desarrollo científico desemboca entonces en un real dilema metafísico, trágico y abstracto. El «hombre» debe escoger entre la tentación, tranquilizante pero irracional, de buscar en la naturaleza la garantía de los valores humanos, la manifestación de una pertenencia esencial y la fidelidad a una irracionalidad que lo deja solo en un mundo mudo y estúpido.

Otro tema mezcla sus ecos con los del desencanto; es el de la dominación: el mundo desencantado es al mismo tiempo manejable. Si la ciencia concibe el mundo como sometido a un esquema universal que reduce su diversidad a las tristes explicaciones de leyes generales, se ofrece a través de ellos como un sistema de control y dominación.

---

[7] J. Monod, *Le Hasard et la Nécessité*, pp. 187-188. Véase también el libro de C. C. Gillipsie, *The Edge of Objectivity* (Princeton, University Press, 1970), quien escribe una historia de las ciencias basada en el progreso de la objetividad científica y la lucha contra los diferentes movimientos anticientíficos cada vez engendrados por un deseo de seguridad y pertenencia.

El hombre extraño al mundo, se coloca como dueño de este mundo.

Aquí figuran las tesis más que peligrosas de Heidegger. El proyecto científico realiza lo que apuntaba desde el alba griega: la voluntad de potencia que escondería toda racionalidad. El embargo científico y técnico que según Heidegger se desencadena hoy a escala planetaria, revela la violencia implícita en todo saber positivo y comunicable.

El embargo técnico: Heidegger no pretende refutar tal o cual realización técnica en particular. Interroga la esencia de la técnica, la dimensión técnica de la inserción humana en la naturaleza. No es el hecho de que la contaminación industrial ponga en peligro la vida animal en el Rhin lo que le preocupa, sino el hecho mismo de que éste sea puesto al servicio del hombre mediante un cálculo: «La central eléctrica está construida en la corriente de Rhin. Le obliga a ceder su presión hidráulica, lo que obliga a su vez a las turbinas a girar...; la central no está construida en la corriente del Rhin, como el viejo puente de madera que desde hace años comunica una orilla con la otra. Es más bien la corriente la que está encerrada en la central. Lo que hoy es corriente, a saber, un suministro de presión hidráulica, es la propia manera de ser de la central» [8].

El embargo científico: no es un problema técnico particular ni ninguna teoría concreta lo que preocupa a Heidegger; cada una de ellas constituye un instante de la puesta en marcha del proyecto global que acompaña y constituye la historia de Occidente. El hombre de ciencia, al igual que el técnico, es la sede de una voluntad de potencia disfrazada de conocimiento, su aproximación a la cosas es una violencia sistemática. En la visualización teórica que define a la ciencia, Heidegger ve una interpretación de las cosas que las reduce a objetos esclavizados ofrecidos a la dominación de la mirada: «La física moderna no es una física experimental porque dispone de aparatos para interrogar a la naturaleza. Es al contrario: es porque la física —como pura teoría— fuerza a la naturaleza a mostrarse como un complejo calculable y predecible de fuerzas que la experimentación está forzada a interrogarla, a fin de que sepamos si y cómo responde la naturaleza a la llamada» [9].

[8] M. Heidegger, «Die Frage nach der Technik», en *Vortrage und Aufsätze*, Neske Verlag, 1954, p. 15. Existe una traducción francesa: «La question de la technique», en *Essais et conférences*, París, Gallimard, 1958, pp. 21-22.

[9] *Ibid.*, p. 21; trad. fran., p. 29.

Esta hostilidad radical apunta tanto al trabajo técnico como a todo saber comunicable; el viejo puente sobre el Rhin se ve perdonado, no como testimonio de un «saber hacer» probado, de una observación laboriosa y precisa, sino porque deja correr la corriente del Rhin. Las revelaciones sensacionales de Bergier y Pauwels en *La rebelión de los brujos* están acompañadas también de un desprecio declarado por la ciencia oficial, juzgada trivial y agobiante, y por la trivialidad cotidiana de las preocupaciones de la mayoría de los hombres. Se anuncia como contraste una realidad «distinta», una ciencia llena de misterio, reservada a los iniciados, y que enlaza con las prácticas esotéricas de los alquimistas, taumaturgos y otros magos. «Mientras que millones de hombres civilizados abren libros, van al cine o al teatro para saber cómo Françoise se emocionará ante René, pero odiando a la querida de su padre, se convertirá en lesbiana por sórdida venganza, los investigadores que hacen cantar a los números una música celestial se preguntan si el espacio no se contrae alrededor de un vehículo» [10].

Cientifismo triunfante, diremos, la ciencia es la dueña de los destinos de la humanidad, conduce al mundo a un mañana desconocido e inimaginable: «Si volviera a vivir, no escogería ser escritor y dejar pasar mis días en una sociedad retrasada donde la aventura gire alrededor de las camas, como un perro. Me haría falta una aventura leonina. Sería físico teórico, para vivir en el corazón de lo verdaderamente novelesco» [11].

Esta «aventura-leonina» no es, sin embargo, como la de los esfuezos laboriosos y públicos de las comunidades científicas. La ciencia que se nos revela es una ciencia producida por intuiciones inhumanas de cuasi-mutantes y no por la discusión crítica y por el lento trabajo experimental, más bien transmitida en secreto que en coloquios científicos. Lo que Bergier y Pauwels y, más recientemente, Ruyer [12], invitan a pensar, es que las preocupaciones del hombre «medio» y los conocimientos basados en sus preocupaciones pertenecen a un mundo dejado atrás, del cual somos los engañados. La aventura, según ellos, está en otra parte, en lo infinitamente grande y en lo infinitamente pequeño. Si se sigue a Bergier y Pauwels, el «hombre co-

---

[10] L. Pauwels y J. Bergier, *Le Matin des magiciens*, París, Le Livre de Poche, 1970, p. 46.

[11] L. Pauwels y J. Bergier, *op. cit.*, pp. 48-49.

[12] R. Ruyer, *La Gnose de Princeton*, París, Fayard, colección Pluriel, 1977.

mún» puede todo lo más esperar que algunos iniciados se dignen algún día a estudiar los problemas más triviales de las organizaciones de nuestras sociedades, pulverizando las polvorientas teorías hacia las cuales ningún desprecio se queda corto. Quizá, insinúan, ello ha sucedido y, sin que lo sospechemos, nuestro futuro está determinado por un reducido número de hombres que «saben».

Esta mística de la ciencia esotérica, de un «mundo donde los ciclotrones son como catedrales, en donde las matemáticas son como un canto gregoriano, en donde las transmutaciones operan no solamente en el seno de la materia, sino también en los cerebros» [13], anuncia una «cruzada» en el futuro. Esta cruzada es, en el contexto actual, tan peligrosa como el rechazo de la ciencia o la exaltación de las auroras míticas griegas. Nuestra época se ve confrontada a problemas materiales y técnicos cruciales. Sabemos que la gestión de nuestras sociedades depende cada vez más del buen uso de la ciencia y de la técnica. En estas condiciones, un poco de lucidez no estaría de más: en los científicos, frente a las necesidades y exigencias expresadas socialmente; en los ciudadanos, para las posibilidades reales de sus conocimientos respectivos. La huida hacia el mito de una ciencia misteriosa y todopoderosa no puede sino contribuir a enmascarar la dificultad real de los problemas que la historia plantea.

Hay otro tipo de crítica a propósito de la ciencia, cuya pertinencia hay que reconocer. Citaremos aquí como ejemplo la conclusión de Koyré y su estudio sobre el alcance de la síntesis newtoniana: «Sin embargo, hay algo de lo que Newton se ha responsabilizado o, mejor dicho, no solamente Newton, sino la ciencia moderna en su generalidad: es la división de nuestro mundo en dos. He dicho que la ciencia moderna había desmantelado las barreras que separaban el Cielo y la Tierra, que unifica y unificó el Universo; esto es verdad. Pero también he dicho que lo hizo sustituyendo nuestro mundo de cualidades y percepciones sensibles, mundo en el cual vivimos, amamos y morimos, por otro mundo: el mundo de la cantidad, de la geometría verificada, un mundo en el que hay sitio para todo menos para el hombre. Así, el mundo de la ciencia —el mundo real— se alejó y separó por completo del mundo de la vida, que la ciencia ha sido totalmente incapaz de explicar —incluso con una explicación que lo disolviese—, que hiciese de él una apariencia "subjetiva".»

---

[13] L. Pauwels y J. Bergier, *op. cit.*, p. 56.

«En realidad estos dos mundos están todos los días —y cada vez más— unidos por la praxis. Pero para la teoría están separados por un abismo.»

«En esto consiste la tragedia del espíritu moderno que "resolvió el enigma del Universo", pero solamente para reemplazarlo por otro: el suyo propio [14].»

La crítica de Koyré abre una nueva perspectiva: ya no estamos reducidos a la alternativa entre una ciencia que hace del hombre un extraño en un mundo desencantado y una protesta anticientífica, léase antirracional.

Es en esta perspectiva en la que nos situamos. Queremos mostrar que nuestra ciencia ya no es la ciencia clásica criticada por Koyré, y no, como piensan Bergier y Pauwels, porque sus nuevos objetos serían extraños, más cercanos a la magia que al pensamiento común, sino porque es capaz de ahora en adelante de comprender y describir, al menos parcialmente, los procesos que constituyen el mundo *más familiar*, el mundo natural, donde evolucionan los seres vivos y sociedades.

Retrospectivamente, podemos comprender hasta qué punto la ciencia clásica se encontraba en la incapacidad de comprender el devenir natural, de tal manera que las extrapolaciones que intentaba a partir de sus teorías debía, en cierta manera, llevar a la negación, en particular de la posibilidad de evoluciones creativas de novedad y complejidad. Vamos a explorar la fuerza y la debilidad de la ciencia newtoniana, la coherencia de su armazón conceptual y de sus lagunas. Nuestra exposición encontrará su eje en el problema del tiempo, que constituye el punto a propósito del cual mejor se pone en evidencia la dimensión de la ciencia «newtoniana». Es una cuasi-evidencia: el tiempo asociado a la evolución biológica o a la de las sociedades no *es el mismo* que el que describe el movimiento de los planetas o el péndulo ideal. Sin embargo, la ciencia newtoniana se muestra incapaz de integrar esta idea. Por otra parte, es alrededor de los temas de la irreversibilidad, del proceso de organización y de la innovación, donde se han desarrollado las teorías que nos permiten hoy hablar de una metamorfosis de la ciencia.

Una de las perspectivas más prometedoras, abierta por esta metamorfosis, es el fin de la ruptura cultural que hace de la ciencia un

[14] A. Koyré, *Etudes Newtoniennes*, París, Gallimard, 1968.

cuerpo extraño y que le da la apariencia de una fatalidad a asumir o de una amenaza a combatir. Queremos demostrar que las ciencias matemáticas de la naturaleza, en el momento en que descubren los problemas de complejidad y evolución, se convierten igualmente capaces de entender algo del significado de algunas cuestiones expresadas por los mitos, las religiones, las filosofías; capaces también de medir mejor la naturaleza de los problemas propios de las ciencias cuyo interés es el hombre y las sociedades humanas.

Un proceso cultural nuevo, la constitución de una «tercera cultura» (por utilizar la expresión de Snow, que señalaba su nacimiento en un suplemento a su obra sobre la cultura de nuestra época) [15], podría tomar cierta importancia desde ese momento. Una tercera cultura: es decir, un medio donde pueda iniciarse el diálogo indispensable entre el paso de una modelización matemática y la experiencia conceptual y práctica de aquellos —economistas, biólogos, sociólogos, demógrafos, médicos— que intentaron describir la sociedad humana en toda su complejidad. Que un medio intelectual así pueda desarrollarse —y un obstáculo importante en su desarrollo queda eliminado cuando las ciencias físicas tienen los medios de reconocer la validez de los problemas que ocupan a los especialistas de otras ciencias— condiciona sin lugar a dudas la puesta en marcha de nuestros recursos conceptuales y técnicos en la crisis contemporánea.

3. *La síntesis newtoniana*

¿Cómo explicar el entusiasmo de los contemporáneos de Newton, su convicción de que al fin el secreto del mundo, la verdad de la naturaleza, había sido revelada?

Como lo expresan los versos de Desaguliers, el triunfo newtoniano consigue, a sus ojos, el logro de la síntesis original intentada por la ciencia moderna entre varias preocupaciones, presentes al parecer en todas las civilizaciones humanas: manifiesta que la naturaleza no puede resistir al procedimiento experimental, fruto de la nueva alianza entre *teoría* y *práctica* de manipulación y de transformación.

La ciencia newtoniana es una ciencia *práctica;* una de sus fuentes es muy claramente el saber de los artesanos de la Edad Media, el sa-

[15] C. P. Snow, *The two Cultures and a Second Look,* Cambridge University Press, 1964.

ber de los constructores de máquinas; ella misma da, al menos en principio, los medios para actuar sobre el mundo, prever y modificar el curso de ciertos procesos, concebir dispositivos y poner en marcha y explotar algunas de las fuerzas y de los recursos materiales de la naturaleza.

En este sentido, la ciencia moderna prolonga el esfuerzo milenario de nuestras sociedades por organizar y utilizar al mundo. Sabemos bien poco de la prehistoria de estos esfuerzos; podemos, sin embargo, medir retrospectivamente la suma de conocimientos y de técnicas que necesitó lo que se ha venido a llamar la revolución neolítica. Cazador-cosechador, el hombre aprendía a administrar ciertos dominios del medio natural y social gracias a nuevas técnicas de explotación de la naturaleza y de estructuración de la sociedad.

Vivimos aún bajo las técnicas neolíticas —especies animales y vegetales creadas o seleccionadas, tejido, alfarería, trabajo de los metales—. Nuestra organización social se ha contentado, durante mucho tiempo, con las mismas técnicas de escritura, de geometría y de aritmética que fueron necesarias para organizar los grupos sociales, diferenciados y estructurados jerárquicamente, de las ciudades-estado neolíticas [16]. ¿Cómo no reconocer la continuidad entre las técnicas neolíticas y las técnicas científicas?

Tenemos que admitir igualmente que el desarrollo de estas técnicas supone, durante la edad neolítica y los milenios que la preceden, la prosecución de una actividad de explotación de los recursos naturales y de búsqueda empírica de métodos de puesta en funcionamiento de estos recursos; lo que da testimonio de la existencia no solamente de individuos cuyo espíritu de observación e invención debe-

[16] En «Race et histoire» (Anthropologie structurale 2, París, Plon, 1973), Claude Lévi-Strauss ha discutido las condiciones bajo las cuales podemos aproximar las revoluciones neolítica e industrial. El modelo que introduce a este respecto, en términos de reacciones en cadena iniciados por catalizadores —procesos con cinética singular, con fenómenos de umbral y *puntos singulares*—, da la clave de una posible afinidad entre las problemáticas de estabilidad e inestabilidad que analizamos en el capítulo VIII y ciertos temas de lo que se ha venido a llamar, con un término correcto pero restrictivo, la aproximación estructural en antropología. Esta posibilidad es el objeto de un estimulante desarrollo de Gilles Deleuze, en un artículo consagrado al estructuralismo (en : F. Chatelet, *Histoire de la Philosophie*, vol. 8, París, Hachette, 1973). También es objeto de los trabajos de los que se llamarán, sin duda más tarde, estructuralistas post-comtianos (A. Moles, M. Serres y algunos otros, abiertos a las aproximaciones cinética y estadística).

ría compararse al de los grandes hombres de nuestra historia intelectual, sino también de sociedades capaces de suscitar, acoger, de conservar y perfeccionar la obra de estos innovadores.

La ciencia moderna prolonga este antiguo esfuerzo, lo amplifica y le confiere un ritmo acelerado. Pero el proyecto de puesta en funcionamiento en el medio no agota el significado de la ciencia en el sentido que la revolución newtoniana le ha dado, no más que el del *pensamiento salvaje*.

Encontramos en toda sociedad humana habilidades y técnicas y también un conjunto de relatos que parecen explicar e interpretar la organización del mundo y la situación de la sociedad humana en el seno de la naturaleza. Como los mitos y las cosmologías, la ciencia trata de *comprender* la naturaleza del mundo, la manera en la cual está organizado, el sitio que los hombres ocupan en él.

En un punto decisivo, el pensamiento científico se aparta, sin embargo, del interrogante mitológico que recoge. Ha proclamado su sumisión a los procedimientos de la verificación y de la discusión crítica [17]. Sin embargo, hay que tratar de no olvidar que esta declaración de intenciones caracteriza toda forma de pensamiento crítico y sabemos que Demócrito o Aristóteles no pertenecen a la ciencia moderna, cualquiera que sea su actitud al discernir, por verificación y discusión, lo verdadero de lo falso. Tendremos, así, que distinguir cuidadosamente el pensamiento crítico en general y la singularidad que se introduce en nuestro mundo bajo las especies de la «ciencia moderna».

Poco importa si las primeras especulaciones de los pensadores presocráticos se despliegan en un espacio parecido al del mito de la creación hesiódica: polarización inicial del cielo y la tierra, que fecunda el deseo despertado por el amor; nacimiento de la primera generación de dioses, potencias cósmicas diferenciales; combates y desórdenes, ciclos de atrocidades y de venganzas, hasta la estabilización fi-

---

[17] «En el seno de cada sociedad, el orden del mito excluye el diálogo: no se discuten los mitos del grupo, los transformamos creyendo repetirlos» (Claude Lévi-Strauss, *Mythologiques 4*, París, Plon, 1971, p. 585). El discurso mítico se distingue, pues, de los diálogos críticos (filosóficos o científicos), pero es más en función de sus condiciones prácticas de reproducción que a causa de una fuerte inaptitud de tales o cuales emisores para pensar racionalmente. Diremos que la práctica del diálogo crítico ha impreso a los verdaderos discursos cosmológicos una aceleración evolutiva espectacular.

nal: el reparto de poder en la sumisión a la Justicia *(dikè)*. El hecho es que, en el espacio de algunas generaciones, los presocráticos van a pasar revista —explorar y criticar— algunos de los principales conceptos que nuestras ciencias han vuelto a encontrar y que aún tratamos de articular para descubrir las relaciones entre el ser, eterno e inmutable, y el porvenir, para comprender la génesis de lo que existe a partir de un medio indiferenciado [18].

¿Por qué lo homogéneo es inestable y se diferencia? ¿Constituyen las cosas, frágiles y mortales, otras tantas injusticias o desequilibrios que infringen el balance de fuerzas que regula el enfrentamiento de potencias naturales? ¿O bien el motor de las cosas les es extraño, acciones rivales de amor y de lucha que determinan el nacimiento, desarrollo, declive y dispersión? ¿Es el cambio ilusorio o es la lucha movida de los opuestos lo que constituye las cosas? ¿Pueden los cambios cualitativos ser reducidos a movimientos en el vacío de configuraciones de átomos, o es que los átomos son una multitud de gérmenes cualitativamente diferentes, en los cuales ninguno se parece a los otros? ¿Es la armonía del mundo matemática? ¿Dan los números la clave de la naturaleza?

La ciencia numérica de los sonidos construida por los pitagóricos pertenece todavía a nuestras teorías acústicas. En cuanto a las teorías matemáticas desarrolladas por los griegos, constituyen, en la historia europea, la primera teoría abstracta y rigurosa cuyos resultados se dan como comunicables y restituibles por todo ser dotado de razón y cuyas demostraciones —que establecen la verdad o el error de las tesis— tienen un grado de certidumbre independiente de las convicciones, las esferas y las pasiones.

Sabemos pocas cosas sobre la filosofía de Jonia y de la Magna Grecia, pocas cosas sobre las relaciones entre el desarrollo de las hipótesis teóricas y la actividad artesanal y técnicas florecientes en estas ciudades. Se dice que a consecuencia de una reacción religiosa y social hostil, algunos filósofos fueron acusados de ateísmo, expulsados o asesinados. Esta historia de «puesta en orden» pone en evidencia la importancia de los temas del testimonio y del riesgo —del martirio— en los relatos sobre la génesis y la amplificación de las innovaciones conceptuales. Explicar el éxito de la ciencia moderna será *tam-*

[18] Nos inspiramos en los párrafos que siguen, análisis de J. P. Vernant, *Mythe et pensée chez les Grecs*, Maspéro, y M. Detienne, J. P. Vernant, *Les ruses de l'intelligence, la Métis des Grecs*, París, Flammarion, 1974.

bién explicar por qué los practicantes de la ciencia moderna no fueron perseguidos de forma masiva y su aproximación teórica, ahogada en provecho de una organización sistemática del saber, según las categorías conformes a las expectativas colectivas.

En todo caso, en la época de Platón y Aristóteles se fijan límites que canalizan el pensamiento en las direcciones socialmente aceptables. En particular, la distinción entre *pensamiento teórico* y *actividad técnica* queda fijada. Las palabras que nosotros empleamos hoy, máquina, mecánica, ingeniero, tienen una historia etimológica análoga: no se trata de saber racional, sino de astucia y artificio; no se trata simplemente de *conocer* los procesos naturales, se trata de engañar a la naturaleza, de *maquinar* algo, de obtener maravillas, la creación de efectos extraños al orden natural. La heterogeneidad entre el dominio de la manipulación práctica y del conocimiento racional de la naturaleza es chocante: Arquímedes no tendrá status más que de matemático, de ingeniero; su análisis matemático del equilibrio de las máquinas no es considerado como transferible al mundo de la naturaleza, al menos en el cuadro de la física antigua tradicional.

Otra heterogeneidad firmemente establecida, la del cielo y de la tierra, del mundo de los astros inmutable y eterno y del mundo sublunar en donde todas las cosas son cambiantes, mortales, sometidas a las pasiones y a la corrupción. Uno de los aspectos más generales que el estudio comparado de las religiones destaca en las sociedades antiguas es la división entre el espacio profano y el espacio sagrado; el espacio ordinario, sometido a aleatoriedad, a degradación, insignificante, está separado del mundo sagrado, significante, sustraído a la contingencia y la historia.

Es el mismo contraste que supone Aristóteles entre el mundo de los astros y el de la naturaleza terrestre. Este contraste se encuentra en la evaluación de las posibilidades de aplicar las matemáticas a la descripción del mundo. Ya que el movimiento de los astros no es un cambio, sino un estado perfecto y eternamente idéntico a sí mismo, puede ser descrito (sin por ello ser explicado) por las matemáticas. Pero en lo que concierne al mundo sublunar, la descripción matemática no es pertinente. Los procesos naturales, intrínsecamente imprecisos, no pueden ser objeto más que de descripciones matemáticas aproximadas, abstracción hecha de su irreducible particularidad.

Para Aristóteles, la pregunta interesante no es tanto *cómo* un proceso se produce, sino *por qué* se produce —o más bien, estas dos preguntas no pueden separarse—. Volveremos sobre la idea de que una

de las fuentes del pensamiento aristotélico fue la observación del desarrollo de los embriones, proceso organizado a lo largo del cual los acontecimientos se encadenan y se responden a pesar de su independencia aparente y participan en un proceso de conjunto que parece obedecer a un plan global. Siguiendo el ejemplo del desarrollo embrionario, toda la naturaleza aristotélica está organizada según las causas finales que dan también la clave de la inteligibilidad. Los cambios, si responden a la *naturaleza* de las cosas, tienen como razón el realizar cada ser en la perfección de su *esencia* inteligible. Es, pues, esta esencia —que para los seres vivos es a la vez causa final, formal y eficiente— lo que se trata de comprender.

Una de las lecturas posibles de lo que se llama el nacimiento de la ciencia moderna hace del enfrentamiento entre los aristotélicos y Galileo un enfrentamiento entre dos racionalidades basadas la una sobre el mundo sublunar (el mundo organizado de los seres vivos) y la otra sobre el mundo de los astros y de las máquinas, asociados por el hecho decisivo de ser matematizables. En este caso era un enfrentamiento sin remedio, ya que cada uno debía definir de manera diferente lo que en la naturaleza es significativo y lo que constituye un efecto secundario, es decir, una ilusión [19].

Para Galileo, la pregunta «por qué», prioritaria para los aristotélicos, debe ser excluida de la ciencia. Estos últimos, al contrario, *debían* atribuir a un fanatismo irracional el tipo de relación mantenido por Galileo con el saber empírico de los ingenieros: el modo de interrogación experimental.

4. *El diálogo experimental*

Llegamos así a lo que constituye para nosotros la singularidad de la ciencia moderna: el encuentro entre la técnica y la teoría, la alianza sistemática entre la ambición de modelar el mundo y el de comprenderlo.

Para que tal encuentro sea posible, no bastaba, contrariamente a lo que los empiristas han querido creer, una relación de *respeto* hacia los hechos observables. Sobre ciertos puntos, incluyendo la descripción de los movimientos mecánicos, es la física tradicional la que se

[19] Es la tesis preferida de Koyré, notablemente en sus *Études galiléennes* (París, Hermann, 1966).

sometía con la mayor fidelidad a la evidencia empírica [20]. El diálogo experimental con la naturaleza, que la ciencia moderna se descubre capaz de llevar a cabo sistemáticamente, no supone una observación pasiva, sino una *práctica.* Se trata de manipular, de poner en escena la realidad física hasta conferirle una proximidad máxima con respecto a una descripción teórica. Se trata de preparar el fenómeno estudiado, de purificarlo, de aislarlo hasta que se parezca a una *situación ideal,* físicamente irrealizable pero inteligible por excelencia, ya que encarna la hipótesis teórica que guía la manipulación. La relación entre experiencia y teoría procede entonces del hecho de que la experimentación somete los procesos naturales a una interrogación que no tiene sentido más que con referencia a una hipótesis concerniente a los principios a los cuales estos procesos se ven sometidos y a un conjunto de presupuestos concernientes a los comportamientos, que sería absurdo atribuir a la naturaleza.

Tomemos el ejemplo de la descripción del funcionamiento de un sistema de poleas, clásico desde Arquímedes, generalizado por los modernos al conjunto de las máquinas simples. En este caso, es destacable el hecho de que la explicación moderna elimina como perturbación secundaria lo que precisamente la física aristotélica quería explicar: el hecho de que, escenario típico, la piedra «resiste» al caballo que tira de ella y que esta resistencia puede ser «vencida» si la tracción se hace por intermedio de un sistema de poleas. Según el principio en función del cual Galileo juzga la naturaleza, ésta no hace regalo alguno, no da nada gratuitamente y es imposible engañarla; es absurdo pensar que podamos hacerle producir por astucia y artificio un trabajo *suplementario* [21]. Ya que el trabajo del caballo es el mismo, *con o sin* poleas, *debe* producir el mismo efecto. Tal será el pun-

---

[20] Alexandre Koyré ha insisitido mucho sobre este punto: en sus principios, la ciencia moderna ha debido luchar no solamente contra la tradición metafísica reinante, sino también contra la tradición empirico-técnica (en especial en la «La dynamique de Nicolo Tartaglia», en *Etudes d'histoire de la pensée scientifique,* París, Gallimard, 1973). Precisemos que este comentario no implica de ninguna manera, según nosotros, que el saber artesanal desarrollado durante la Edad Media no sea una de las raíces del conocimiento científico moderno.

[21] Los esfuerzos consagrados por los ingenieros, hasta el siglo XX, a la construcción de un móvil perpetuo atestiguan la innegable persistencia de esta idea: un dispositivo ingenioso puede *saltarse por alto* los principios que regulan nuestros intercambios con la naturaleza. Véase A. Ord-Hume, *Perpetual Motion. The History of an Obsession,* Nueva York. St. Martin's Press, 1977.

to de partida de la explicación mecánica moderna. Esta se refiere a un mundo ideal donde el efecto «nuevo» (la piedra puesta al fin en movimiento) es *secundario,* la «resistencia» de la piedra se explica por el rozamiento que produce un calentamiento. Lo que, por el contrario, se describe con precisión, es la situación ideal en donde una relación de equivalencia une la causa, el trabajo del caballo, al efecto, el desplazamiento de la piedra. En este mundo ideal, *el caballo puede desplazar la piedra de todas formas,* y el sistema de poleas tiene como único resultado el de modificar el modo de transmisión de los esfuerzos de tracción: en vez de desplazar la piedra sobre la misma longitud L sobre la que se desplaza él mismo tirando de la cuerda, el caballo no la desplaza más que una longitud L/n, en donde n depende del número de poleas. Las poleas, como cualquier máquina simple, no son más que un dispositivo pasivo, solamente capaz de transmitir el movimiento y no de producirlo.

El diálogo experimental constituye un paso muy particular. La experimentación interroga a la naturaleza, pero a la manera de un juez, en nombre de principios postulados. La respuesta de la naturaleza se registra con la mayor precisión, pero su pertinencia se evalúa en referencia a la idealización hipotética que guía el experimento: todo lo demás es habladuría, efectos secundarios despreciables. La naturaleza puede ciertamente refutar la hipótesis teórica en cuestión, pero ésta no deja por ello de constituir el patrón que mide el alcance y el sentido de la respuesta, cualquiera que sea ésta. El paso experimental constituye entonces un *arte,* es decir, que reposa sobre una habilidad y no sobre reglas generales y se encuentra por ello sin garantía, expuesto a la trivialidad y a la ceguera; ningún método puede eliminar el riesgo de perseverar, por ejemplo, en una interrogación sin pertinencia. Arte de elección, de discernimiento progresivo, de examen exhaustivo de todas las posibilidades de respuesta de la naturaleza en una situación precisa, el arte experimental consiste en escoger un problema para formular una hipótesis teórica y en reconocer en la complejidad proliferante de la naturaleza un fenómeno susceptible de encarnar las consecuencias de este decreto general; se trata entonces de poner en escena el fenómeno elegido hasta que podamos decidir de manera comunicable y reproducible si ese fenómeno es o no es descifrable según el texto matemático particular que la hipótesis ha enunciado.

Procedimiento experimental, criticado desde su origen, minimizado por las descripciones empiristas de la actividad científica, ata-

cado como una tortura, puesta a prueba de la naturaleza, irracionalidad violenta: él es el que, a través de las modificaciones del contenido teórico de las descripciones científicas, se mantiene y define el nuevo modo de exploración puesto en práctica por la ciencia moderna. Todavía hoy son «experimentos de pensamiento», escenificaciones imaginarias de situaciones experimentales enteramente regidas por los principios teóricos, los que han permitido explorar las consecuencias de los trastornos conceptuales de la física contemporánea: la relatividad, la mecánica cuántica. Así pues, ese famoso tren de Einstein desde el cual un observador puede medir la velocidad de propagación de un rayo de luz emitido a lo largo de la «vía», es decir, desplazándose con una velocidad c en un sistema de referencia con respecto al cual el tren se desplaza a una velocidad v. Clásicamente, el observador embarcado en el tren debería atribuir a la luz que se desplaza en el mismo sentido que él una velocidad $c-v$; pero esta conclusión clásica constituye precisamente el nuevo absurdo teórico cuyo cuestionamiento constituye la razón de ser de la concepción del experimento de pensamiento; en efecto, la velocidad de la luz aparece en adelante como una *constante universal* dentro de las leyes de la física; para evitar que estas leyes y con ellas el comportamiento físico de los cuerpos varíen con el movimiento de estos cuerpos, es necesario modificar el principio clásico de suma de velocidades, afirmar que, en lo que concierne a la luz, cualquiera que sea el sistema de referencia desde el cual es observado, se medirá siempre la misma velocidad, c; y el tren de Einstein podría entonces recorrer las consecuencias físicas de esta modificación fundamental.

El procedimiento experimental define el conjunto de diálogos con la naturaleza intentados por la ciencia moderna; funda la originalidad de esta ciencia, su especificidad y sus límites. Ciertamente, es una naturaleza simplificada, preparada, a veces mutilada en funcion de la hipótesis previa, aquella que la experimentación interroga; ello *no* le impide guardar, en general, los medios para desmentir la mayoría de las hipótesis. Destacaba Einstein que la naturaleza, a las preguntas que se le hacen, respondía la mayoría de las veces *no*, y, a veces, *quizá*. El hombre de ciencia no hace, pues, todo lo que quiere, no le hace decir a la naturaleza aquello que él quiere; no puede, por lo menos a término, proyectar sobre ella cualquiera de sus más queridos deseos y esperanzas. El hombre de ciencia corre de hecho riesgos tanto mayores cuanto su táctica mejor cree cercar la naturaleza, colocar-

la, más precisamente, entre la espada y la pared [22]. Ciertamente, como subrayan los críticos, cualquiera que sea la respuesta, sí o no, la naturaleza se ve siempre forzada a confirmar el lenguaje teórico en el cual se le dirige la palabra. Pero este mismo lenguaje evoluciona según una compleja historia en donde intervienen a la vez el balance de las respuestas obtenidas de la naturaleza, la relación con otros lenguajes teóricos y también la exigencia que renace sin cesar bajo nuevas formas, en nuevas preguntas, de comprender la naturaleza según lo que cada época define como pertinente. Relación compleja entre las reglas específicas del juego científico —y en particular el modo experimental de diálogo con la naturaleza, el cual constituye una ligadura importante de este juego— y una cultura a la cual, incluso a pesar suyo, el hombre de ciencia pertenece, que influye en sus preguntas y en la cual las respuestas que transcribe dejan huella.

El protocolo de diálogo experimental representa para nosotros una adquisición irreversible. Garantiza que la naturaleza interrogada por el hombre será tratada como un ser *independiente*, al cual forzamos ciertamente a expresarse en un lenguaje quizá inadecuado, pero a quien los procedimientos prohíben prestar aquellas palabras que desearíamos oír. Fundamenta también el carácter comunicable y reproducible de los resultados científicos; cualquiera que sea el carácter parcial de lo que exigimos expresar a la naturaleza, en cuanto ésta ha hablado en condiciones reproducibles, todo el mundo se inclina: ya que ella no podría engañarnos.

5. *El mito en los orígenes de la ciencia*

La convicción característica de los fundadores de la ciencia moderna va mucho más lejos; Galileo y sus sucesores piensan en la ciencia como capaz de descubrir la verdad *global* de la naturaleza. No solamente la naturaleza está escrita en un lenguaje matemático descifrable por la experimentación, sino que este lenguaje es único; el mundo es homogéneo, la experimentación local descubre una verdad general. Los fenómenos simples que la ciencia estudia pueden en ade-

[22] Es esta pasión del riesgo inseparable del juego experimental lo que Popper ha traducido en principios normativos en *La lógica de la investigación científica*, cuando ha afirmado que el hombre de ciencia *debe* buscar la hipótesis menos probable, es decir, las más arriesgadas, e intentar refutarlas.

lante proporcionar la clave del conjunto de la naturaleza cuya complejidad no es más que aparente: la diversidad se reduce a la verdad única de las leyes matemáticas del movimiento.

Es posible que esta convicción, que viene a complementar el método experimental *y que lo inspiró en parte,* haya sido necesaria a la ciencia moderna en sus principios. Era quizá necesaria una nueva concepción del mundo, tan global como lo era la concepción «biológica» del mundo aristotélico, para romper la sujeción de la tradición, dar a los partidarios de la experimentación una convicción y una potencia polémica que les hicieran capaces de afrontar la forma reinante del racionalismo. Era necesaria, quizá, una convicción «metafísica» para transmutar el saber de los artesanos, de los constructores de máquinas, en un nuevo modo de exploración racional de la naturaleza, en una nueva forma de esta interrogación fundamental que atraviesan todas las civilizaciones y todas las culturas. Esto dicho, podemos preguntarnos qué implicación arrastra la existencia de este tipo de convicción «mítica» en lo que concierne al problema de los orígenes del desarrollo de la ciencia en la época moderna. Sobre esta pregunta, muy discutida [23], nos limitaremos a hacer algunos comentarios con el solo fin de situar nuestro problema: el problema de una investigación en la cual cada progreso ha podido ser vivido como un desencanto, descubrimiento doloroso de la estupidez autómata del mundo.

Es ciertamente difícil negar que los factores sociales y económicos (en particular el desarrollo de las técnicas artesanales en los monasterios, donde se conservan también los restos del saber de un mundo destruido y más tarde en las ciudades dinámicas y comerciantes)

---

[23] El tema de los principios de la ciencia moderna es uno de los puntos en donde más clara está la insignificancia de una historia de las ciencias que se limita a los factores científicos. Una vez dicho esto, ¿cómo abrir la historia de las ciencias? Se enfrentan dos tradiciones: la de Needham, Bernal, Hogben, Haldane, historiadores ingleses para quienes un encuentro con los historiadores soviéticos en 1931 jugó un papel de germen (segundo congreso internacional de historia de la ciencias y de la tecnología, Londres, 1931, publicado bajo el título *Science at the Cross Roads,* reeditado en Londres en 1971. Frank Cass Edition); la que fundó Koyré, para quien la ciencia, fenómeno intelectual, debe ser explicada por factores intelectuales y, en todo caso, por el renacimiento de una forma de platonismo. Para una mayor profundización sobre este asunto, consúltese el artículo de Rupert Hall, «Merton revisited» (en *Science and Religious Belief, a Selection of Recent Historical Studies,* ed. C. A. Russell, Londres, the Open University Press and University of London Press, 1973).

hayan jugado un papel preponderante en los orígenes de la ciencia experimental, saber artesanal sistematizado [24].

También es verdad que un análisis comparativo como el de Needham [25] establece la importancia decisiva de las estructuras sociales al final de la Edad Media: la clase de los artesanos y productores potenciales de innovaciones técnicas no es más que una clase despreciada como en Grecia y, además, tanto los intelectuales como los artesanos son en su mayoría independientes del poder. Son empresarios libres, artesanos inventores a la búsqueda de mecenas, llevados a amplificar al máximo los efectos de una novedad, a difundirla y a explotarle todas las posibilidades, aunque éstas pudieran atentar contra el orden social establecido. Como contraste, dice Needham, los científicos chinos eran funcionarios sometidos a las reglas de la burocracia, servidores de un Estado cuyo primer objetivo era el de mantener la estabilidad y el orden. La brújula, la imprenta, la pólvora, que iban a contribuir a destruir los fundamentos de la sociedad medieval y a lanzar a Europa en la época moderna, fueron descubiertas mucho antes en China, pero jamás tuvieron allí los mismos efectos desestabilizantes. La sociedad europea, empresarial y comerciante, era particularmente apta para suscitar y alimentar el desarrollo dinámico e innovador de la ciencia moderna en sus principios.

Sin embargo, la pregunta vuelve a surgir. Sabemos que los constructores de máquinas utilizaban descripciones y conceptos matemáticos: relación entre las velocidades y los desplazamientos de las diferentes piezas entrelazadas, geometría de sus movimientos relativos. Pero, ¿por qué la matematización no se ha limitado al funcionamiento de las máquinas? ¿Por qué han sido concebidos los movimientos naturales a semejanza de la máquina racionalizada? Esta misma pregunta puede hacerse a propósito del reloj, el cual constituye uno de los triunfos del artesanado medieval y, muy rápidamente, ritma la vida de las primeras comunidades medievales.

¿Por qué se ha convertido casi inmediatmente en el símbolo mismo del orden del mundo? Podemos ver aquí la indicación de una di-

---

[24] Pierre Thuillier ha insistido en contra de Koyré sobre la importancia de la práctica de los constructores de máquinas, en especial en lo que concierne a la concepción de un espacio homogéneo e isotropo. Véase «Au commencement était la machine», en *La Recherche*, vol. 63, enero de 1976, pp. 45-47.

[25] J. Needham, *La Science chinoise et l'Occident. Le grand Titrage*, París, Seuil, collection Point, 1977, en especial el capítulo «Science et Société á l'Est et á l'Ouest».

rección en la cual ciertos elementos de respuesta podrían ser identificados. El reloj es un mecanismo *construido*, sometido a una racionalidad que le es exterior, a un plan que sus engranajes realizan de manera ciega. El mundo reloj constituye una metáfora que remite a Dios Relojero, ordenador racional de una naturaleza autónoma. De la misma forma, un cierto número de metáforas y evaluaciones de la ciencia clásica, de su finalidad y de sus medios, sugieren que en sus comienzos se estableció una *resonancia* entre un discurso teológico y la actividad experimental de teoría y de medida; una resonancia que podría haber contribuido a amplificar y a estabilizar la pretensión según la cual los hombres de ciencia están descubriendo el secreto de la «máquina universal».

Este término de resonancia cubre desde luego un problema de extrema complejidad, que se nos perdonará señalar sin intentar resolverlo. No tenemos, en particular, ni los medios ni el proyecto de adelantar que un discurso religioso ha *determinado* de alguna manera el nacimiento de la ciencia teórica, o la «concepción del mundo» que, históricamente, ha venido a complementar la actividad experimental. Hablando de resonancia y de amplificación mutua entre dos poblaciones de discursos, queremos, de manera expresa, utilizar términos que no supongan hipótesis alguna sobre cuál, si el discurso teológico o el «mito científico», fue primero, o cuál puso en movimiento el otro [26].

Señalemos de paso que la idea de un origen cristiano de la ciencia occidental ha interesado a ciertos filósofos, no solamente para intentar comprender cómo ha podido estabilizarse el discurso sobre la naturaleza autómata y estúpida, sino también para poner de manifiesto una relación que querrían más esencial entre la ciencia y la civilización occidental. En lo que concierne a Alfred North Whitehead, esta relación es del tipo creencia: «hacía falta» un Dios legislador para inspirar a los fundadores de la ciencia moderna la «fe científica» necesaria a sus primeros trabajos; «quiero decir con ello la convicción invencible de que cada acontecimiento puede, en todos sus detalles, ser puesto en correlación con sus antecedentes de una manera del todo

---

[26] La elección que hemos hecho aquí de comentar el papel de los factores no científicos no debe disimular el profundo interés de la ciencia medieval, en el transcurso de la cual se preparan especialmente la síntesis de la aritmética y de la geometría, ante lo cual fracasaron los griegos, y la introducción de la causalidad física en el mundo celeste.

definida, aplicación de principios generales. Sin esta convicción, la increíble labor de los científicos no tendría esperanza. Es el convencimiento instintivo...: que hay un secreto que puede ser desvelado... Aquél no parece poder encontrar su origen más que en una fuente: la insistencia medieval sobre la racionalidad de Dios, concebida con la energía personal de Jehová y con la racionalidad de un filósofo griego» [27]. Sin embargo, incluso cuando invoca la continuidad de la idea de un legalismo universal, que el imperio Romano y más tarde la Iglesia cristiana realizaron sucesivamente en el mundo [28], Whitehead permanece en el nivel *psicológico:* la inspiración cristiana no parece en condiciones de justificar desde el punto de vista *especulativo* el hecho de que hayamos podido pensar la realidad sensible como susceptible de medida y de cálculo, el hecho de que hayamos podido pensar que comprender la naturaleza es descubrir su ley matemática. ¿Cómo podría la naturaleza tener la idealidad de las matemáticas? Es ésta la pregunta que evoca Alexandre Kojève cuando explica que el dogma de la encarnación ha forzado a los cristianos a pensar que el ideal puede hacerse carne. Si un Dios se ha encarnado y ha sufrido, las idealidades matemáticas pueden ser, ellas también, susceptibles de medida en el mundo material [29].

No entraremos en este tipo de discusión; no vemos ningún interés en «probar» que la ciencia moderna «debía» desarrollarse en Europa. No tenemos siquiera que preguntarnos si todos los fundadores de la ciencia moderna creían o no en los argumentos teológicos que invocaban; lo importante es que tenían con ello el medio de hacer sus especulaciones pensables y receptibles, y esto continúa siendo verdad durante un período que varía según los países: las referencias religiosas abundan en el siglo XIX en los textos científicos ingleses. Vemos que esta cuestión de los orígenes de la ciencia nos arrastra hacia una problemática de múltiples dimensiones. Los problemas teológicos y científicos están asociados a lo que se viene en llamar la historia «externa» de la ciencia, es decir, la descripción de la relación entre la forma y el contenido del corpus científico y el contexto social.

---

27 A. N. Whitehead, *Science and the Modern World,* The Free Press, Nueva York, MacMillan, 1967, p. 12.

28 A. N. Whitehead, *op. cit.,* y *Adventure of Ideas,* The Free Press, Nueva York, MacMillan, 1967.

29 A. Kojève. «L‹origine chrétienne de la science moderne», en *L'Aventure de l'esprit,* Mélange Koyré, París, Hermann, 1964.

Sólo nos interesa aquí la naturaleza del discurso científico que se vio ampliado por la resonancia con un discurso teológico.

Cuenta Needham [30] la ironía con la cual los letrados chinos acogieron, en el siglo XVIII, el anuncio por los jesuitas de los triunfos de la ciencia moderna; la idea de que la naturaleza podía estar sometida a leyes simples y conocibles constituía para los mandarines un ejemplo de ingenuidad antropomórfica. Needham ve en esta «ingenuidad» raíces culturales profundas. Para ilustrar la diferencia entre las concepciones occidentales y chinas, recuerda los procesos de animales que conoció la Edad Media. En varias ocasiones, algunos monstruos, tal como un gallo que habría puesto huevos, fueron solemnemente condenados y quemados por haber contravenido las leyes de la naturaleza, identificadas con las leyes de Dios. En China, el mismo gallo habría desaparecido discretamente y no como culpable de algo en particular, sino porque su comportamiento monstruoso habría implicado una disonancia en la armonía natural, lo que a su vez implicaría una situación de desarmonía a nivel social: el gobernador de la provincia, o incluso el Emperador, podría verse en peligro si el síntoma que constituye el gallo llegaba a ser conocido. Según una concepción filosófica dominante en China, explica Needham, el cosmos es acuerdo espontáneo, la regularidad de los fenómenos no es debida a una autoridad exterior, nace en la naturaleza, en la sociedad y en el cielo, del equilibrio mismo entre estos procesos, estables, solidarios, resonando entre ellos en una armonía que nadie dirige. Si fuera cuestión de alguna ley en lo que a ellos se refiere se trataría de una ley que nadie, Dios u hombre, ha pensado jamás, expresada en un lenguaje que el hombre no puede descifrar, y no de la ley dictada por un creador concebido a nuestra imagen, proyección sobre la naturaleza de una convención humana.

Finalmente Needham concluye con esta pregunta: «En la perspectiva de la ciencia moderna no encontramos, evidentemente, ningún residuo de las nociones de mandamiento y de deber en lo que se refiere a las "leyes" de la naturaleza. Pensamos ahora estas nociones en forma distinta: en términos de regularidades estadísticas, válidas únicamente para tiempos y lugares dados, en términos de descripción y no de prescripción... El problema es el de saber si el reconocimiento de estas regularidades estadísticas y de sus expresiones matemáticas podría haber sido alcanzado por otra vía diferente de la que fue

[30] J. Needham, *op. cit.*, p. 221.

efectivamente la vía de la ciencia occidental. Este estado de espíritu, que hizo que un gallo que puso un huevo fuese perseguido por la ley, ¿era quizá necesario en una cultura para que ésta fuera más tarde susceptible de dar un Kepler?» [31].

Precisémoslo para evitar toda confusión; ninguno de entre los que nosotros citamos sostiene que el discurso científico es la transposición de un discurso religioso. El mundo descrito por la física clásica no es el mundo del *Génesis*, en el seno del cual Dios creó sucesivamente la luz, el cielo y la tierra, y más tarde las especies vivientes, en el seno del cual su Providencia no cesó de agitar y de provocar al hombre en una historia en donde se juega su salvación. Al contrario, como veremos, es un mundo atemporal, el cual, si ha sido creado, ha debido serlo de un solo golpe, como un ingeniero construye un autómata que después deja de funcionar. En este sentido, debemos decir que la física se ha constituido tanto en contra de la religión como en contra de las filosofías tradicionales. Y, sin embargo, un Dios cristiano fue, ni más ni menos, llamado a garantizar la inteligibilidad del mundo en un encuentro que no tuvo nada de inocente. Podemos incluso suponer que hubo alguna «convergencia» entre el interés de los teólogos para quienes el mundo debía, con su sumisión total, manifestar la omnipotencia de Dios y el de los físicos a la búsqueda de un mundo de procesos matematizables.

El mundo natural aristotélico, que destruyó la ciencia moderna, no era aceptable ni para estos teólogos ni para los físicos. Este mundo en orden, armonioso, jerárquico y racional era un mundo demasiado autónomo; los seres eran demasiado potentes y activos en él, su sumisión a un Soberano absoluto era dudosa y limitada. Era por otra parte demasiado complejo y diferenciado cualitativamente para ser matematizable [32].

La naturaleza «mecanizada» de la ciencia moderna, naturaleza regida según un plan que la domina, pero que ella no conoce y que no puede consecuentemente más que honrar a su Creador, llena perfec-

---

[31] J. Needham, *op. cit.*, p. 243.

[32] R. Hooykaas ha subrayado esta «des-divinización del mundo» operada por la metáfora cristiana del mundo-máquina en *Religion and the Rise of Modern Science*, Edimburgo y Londres, Scottish Academic Press, 1972, en especial pp. 14-16. Jacques Roger (*Les Sciences de la vie dans la pensée francaise du XVII^e^ siècle*, París, Armand Colin, 1974) ha descrito la afinidad en biología entre el agustinismo y el mecanicismo los cuales «quitan todo a la naturaleza para darlo todo a Dios».

tamente las exigencias de los unos y de los otros. Leibniz había intentado demostrar que la matematización es en principio compatible con un mundo múltiple, de comportamiento activo y cualitativamente diferenciado, pero los hombres de ciencia y teólogos se reúnen para descubrir a la naturaleza como una mecánica estúpida y pasiva, esencialmente extraña a la libertad y a la finalidad del espíritu humano. «*A dull affair, soundless, scentless, colourless, merely the hurrying of matter, endlessly, meaninglessly*» [33], comenta Whitehead. Y es ciertamente como tal como la naturaleza realiza esta convergencia de intereses que evocábamos. La naturaleza que deja al hombre frente a Dios es también la que un lenguaje único —y no las mil voces matemáticas que suponía Leibniz— basta para describir. Esta naturaleza, despojada de lo que permitía al hombre identificarse por su participación en la antigua armonía de las cosas, es también aquella a quien una pregunta bien concebida puede hacer confesar de un solo golpe la verdad única que la anima.

Desde ese momento, el hombre que describe la naturaleza no puede pertenecer a ella, la domina desde el exterior. Aquí otra vez, una teología puede permitir justificar la extraña posición del hombre, el cual, según la ciencia moderna, es capaz de descifrar —aunque laboriosamente, con cálculos y medidas— la ley física del mundo. Galileo explica que el alma humana, creada a imagen de Dios, es capaz de alcanzar las verdades inteligibles que gobiernan el plan de la creación. Puede, por tanto, progresar poco a poco hacia un conocimiento del mundo que Dios, en lo que a El respecta, posee de manera intuitiva, plena y entera [34].

Contrariamente a los atomistas de la antigüedad perseguidos por ateísmos y contrariamente a Leibniz, sospechoso a veces de negar la gracia y la libertad humana, los científicos modernos han conseguido descubrir para su empresa una definición culturalmente aceptable. El espíritu humano, que habita un cuerpo sumiso a las leyes de la naturaleza, es capaz de acceder por el desciframiento experimental al

[33] «Un asunto aburrido, desprovisto de sonido, de olor, de calor, simplemente materia que se acelera sin fin, sin significado», A. N. Whitehead, *Science and the Modern World*, p. 54.

[34] El célebre texto de Galileo a propósito de la naturaleza escrita en caracteres geométricos figura en *Il Saggiatore* y Koyré lo cita en su «Galilée et Platon», en *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, p. 186. Véase también *Dialogues des deux grands systémes du monde* y el estudio de Koyré sobre este texto en *Etudes galiléennes*, pp. 277-290.

punto de vista de Dios sobre el mundo, al plan divino que este mundo expresa global y locamente. Pero este espíritu escapa a su propia empresa. El científico puede definir como cualidades secundarias (no pertenecientes objetivamente a la naturaleza, pero proyectadas sobre ella por el espíritu) todo lo que hace la textura misma de esta naturaleza, los perfumes, los colores, los olores, pero no por ello resulta disminuido. Todo lo contrario, su singularidad eminente se encuentra reforzada: cuanto más se rebaja la naturaleza, tanto más se glorifica al que escapa de ella.

Comprendemos el sentido que pudo revestir el descubrimiento de la gravitación universal: aparentemente un éxito, íntegro, del proyecto de hacer confesar de un solo golpe su verdad a la naturaleza, de descubrir el punto de vista desde el cual, con una sola ojeada dominadora, debemos contemplarla, ofrecida y sin misterio.

6. *El mito científico de hoy*

Hemos tratado de esbozar una situación en la que la práctica científica ha podido verse complementada con una convicción metafísica —Galileo y sus sucesores proponen los problemas de los constructores de máquinas medievales, pero se apartan de su saber demasiado fiel a la complejidad empírica para decretar, con la ayuda de Dios, la simplicidad del mundo y la universalidad de las idealizaciones que pone en escena el procedimiento experimental. Sin embargo, si el mito fundador de la ciencia moderna fue un efecto del complejo singular que creó, a finales de la Edad Media, la puesta en resonancia y la amplificación mutua de los factores económicos, políticos, sociales, religiosos, filosóficos y técnicos, la decomposición de este complejo debía dejar rápidamente aislados, en el seno de una cultura transformada, a la ciencia y a su mito, de aquí en adelante inconfesable.

La ciencia clásica ha nacido en una cultura que dominaba la alianza entre *el hombre*, situado en la bisagra entre el orden divino y el orden natural, y *el Dios* legislador racional e inteligible, arquitecto soberano que habíamos concebido a nuesta imagen. Ha sobrevivido a este ambiguo momento de acuerdo [35] que había permitido a filóso-

[35] Maurice Merleau-Ponty ha subrayado la unidad cultural de esa época, unidad de la cual la ciencia forma parte integrante: «El siglo XVIII es este momento privilegiado en donde el conocimiento de la naturaleza y de la metafísica han creído encon-

fos y teólogos el hacer ciencia y a científicos el descifrar y comentar la sabiduría y la potencia divina en la obra de la creación.

Con el apoyo de la religión y de la filosofía, los hombres de ciencia habían concebido su método como autosuficiente, como susceptible de agotar todas las posibilidades de un acercamiento racional a los fenómenos de la naturaleza. La relación entre descripción científica y filosófica de la naturaleza no tenía en este sentido que ser pensada: se daba por supuesto que la ciencia y la filosofía convergían, que la ciencia descubría los principios de una auténtica filosofía natural. Este sentido de autosuficiencia sobrevivirá en los hombres de ciencia a la retirada del Dios clásico, a la desaparición de la garantía epistemológica que ofrecía la teología. Ciertamente, el científico se encuentra solo sobre la tierra, pero la ciencia que hereda *no es ya aquella que debía defender su método en contra de los aristotélicos.* En adelante, es la ciencia triunfante del siglo XVIII [36]; ha descubierto las leyes del movimiento de los cuerpos celestes y terrestres; d'Alembert y Euler han podido intentar formular los principios en un sistema completo y coherente; Lagrange va a referirse a la historia como una realización lógica hacia la perfección; es la ciencia que honran las Academias fundadas por los soberanos absolutos, Luis XIV, más adelante Federico II y Catalina de Rusia [37]; es la ciencia que ha he-

---

trar un fundamento común. Ha creado la ciencia de la naturaleza y, sin embargo, no ha hecho del canon de la ontología el objeto de la ciencia... El ser no se ha abatido en su totalidad o aplastado sobre el plan del ser exterior. También existe el ser de su sujeto o del alma, y el ser de sus ideas, y la relación de las ideas entre sí, y este universo es tan grande como el otro... La filosofía del siglo XVIII no cesa de proponer todos los problemas que una ontología científica suprimirá instalándose sin crítica en el ser exterior como medio universal.» (*Éloge de la philosophie*, París, Gallimard, collection Idées, 1960, pp. 218-219.)

[36] De todas maneras triunfante en Francia y en las Academias impuestas en Prusia y en Rusia por los soberanos absolutos. Ben David (*The Scientits's role in Society. A Comparative Study*, Foundations of Modern Sociology Series, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1971) ha insistido sobre la diferencia entre la situación de los físicos matemáticos de estos países, que se consagran a la ciencia pura, una actividad prestigiosa pero puramente teórica, y la de los físicos ingleses sumergidos en una multitud de problemas empíricos y técnicos. Ben David propone una correlación entre la fascinación por una ciencia puramente teórica y el mantenimiento lejos del poder de la clase social que alimenta el «movimiento científico», y ve en la ciencia la promesa del progreso social y material.

[37] En su biografía de D'Alembert (*Jean d'Alembert, Science and Enlightment*, Oxford, Clarendon Press, 1970), Thomas Hankins ha subrayado el carácter muy restringido, y ya cerrado, de la primera verdadera comunidad científica en el sentido moder-

cho de Newton un héroe nacional. En resumidas cuentas, es una ciencia *que ha tenido éxito*, que cree haber *demostrado* que la naturaleza es transparente y puede exponerse como tal. «No tengo necesidad de esta hipótesis», responde Laplace a Napoleón cuando le pregunta éste dónde está Dios en su Sistema del Mundo.

Al mismo tiempo que sus pretensiones, sobrevivirán las implicaciones dualistas de la ciencia moderna. Para la ciencia de Laplace, que sigue siendo en muchos aspectos nuestra ciencia, una descripción es tanto más objetiva cuanto más elimina al observador, cuanto más se realiza desde un punto de vista exterior al mundo —es decir, de hecho, desde un punto de vista divino al cual el alma humana, creada a la imagen de Dios, tenía acceso desde los primeros tiempos—. La ciencia clásica apunta siempre a descubrir la verdad única del mundo, el lenguaje único que descifra la totalidad de la naturaleza —hoy día diríamos el *nivel fundamental de descripción*— a partir del cual todo lo que existe puede, en principio, ser deducido. La ciencia clásica postula siempre la monotonía estúpida del mundo que interroga.

Citemos, en referencia a este punto esencial, un texto de Einstein que traduce en lenguaje moderno eso mismo que hemos llamado el mito fundador de la ciencia moderna:

«¿Cuál es la posición que ocupa, entre todas las posibles imágenes del mundo, la del teórico de la física? Esta imagen comporta las más grandes exigencias sobre el rigor y la exactitud de la representación de las relaciones, como sólo puede procurárselo el empleo del lenguaje matemático. Pero, sin embargo, el físico debe limitarse y contentarse con representar los fenómenos más simples que debemos hacer accesibles a nuestra experiencia, mientras que todos los fenómenos más complejos no pueden ser reconstruidos por el espíritu humano con esta precisión sutil y este espíritu de futuro que exige el teórico de la física. La nitidez extrema, la claridad, la certeza no se obtiene más que en detrimento de la integridad. Pero ¿qué atractivo puede tener el hecho de comprender con exactitud una parcela tan pequeña de la naturaleza, dejando de lado, con nitidez y sin valentía, todo lo que hay de más delicado y complejo? ¿Merece el resultado de un esfuerzo tan resignado ese orgulloso nombre de "imagen del mundo"?»

«Creo que este nombre está bien merecido, ya que las leyes ge-

no, la de los físicos-matemáticos del siglo XVIII, y las estrechas relaciones que mantuvo con los soberanos absolutos.

nerales, que sirven de base a la construcción del pensamiento del teórico de la física, tienen la pretensión de ser válidas para todos los acontecimientos de la naturaleza. Por medio de estas leyes, deberíamos poder encontrar, por la vía de la deducción puramente lógica, la imagen, es decir, la teoría de todos los fenómenos de la naturaleza, incluso de aquéllos de la vida, si este proceso de deducción no sobrepasara de lejos la capacidad del pensamiento humano. No es, por tanto, por principio, por lo que renunciamos a la integridad de la imagen física del mundo» [38].

Durante un tiempo, ya lo hemos dicho, algunos habían querido mantener la ilusión de que la atracción, que pone en fórmulas la ley de la gravitación, permite atribuir a la naturaleza una animación intrínseca que, generalizada, explicaría la génesis de formas de actividad cada vez más específicas y selectivas, hasta las interacciones que constituyen la sociedad humana. Esta esperanza de que las fuerzas newtonianas permitirían liberar al mundo de su misión mecánica fue destruida rápidamente. El mundo de las fuerzas no era capaz de responder a las esperanzas románticas y no permitía al científico escapar de su posición de desencarnado observador en medio de una naturaleza presentada como inteligible y transparente.

Este fracaso, junto con el fracaso de otras tentativas de retomar las ambiciones de la ciencia negando su mito, parece establecer la temible coherencia de la visión clásica. De hecho, la única interpretación que haya podido revelarse capaz de rivalizar con esta interpretación de la ciencia fue la negación positivista del proyecto de comprender, en favor del proyecto de experimentar y prever. La verdad es triste, cree descubrir el siglo XIX, el progreso de la ciencia vuelve, cualquiera que sean las convicciones personales del científico, siempre a lo mismo; lo que la ciencia clásica toca se deseca y muere, muere en la diversidad cualitativa, en la singularidad, para hacerse simple consecuencia de una ley general. Lo que había sido *convicción* inspiradora para algunos de los fundadores de la ciencia moderna aparece en adelante como *conclusión* de la ciencia misma, impuesta por su éxito [39], y parece ser, impuesta por la racionalidad y objetividad cientí-

[38] A. Einstein, *op. cit.*, pp. 103-109.

[39] Desde este punto de vista, como veremos en el capítulo III, el éxito de un cierto kantismo, es la justificación de las interpretaciones más triunfalistas del progreso científico en el marco de una nueva coherencia en la cual el hombre, y no Dios, es el centro.

ficas. En cuanto quiere explicar el significado general de sus resultados, situarlos en una perspectiva culturalmente pertinente, el físico no posee otro lenguaje más que el del mito, único discurso coherente que responde a la exigencia profunda de la actividad científica: comprender la naturaleza y la forma en la que las sociedades humanas se insertan en ella.

Hemos vuelto a nuestro punto de partida, a esta idea de que es la ciencia *clásica*, en tanto que producida por una cultura, símbolo mismo durante un tiempo de una unanimidad cultural, y no la ciencia en general, la que ha podido determinar la crisis cultural que hemos descrito. La ciencia clásica no ha podido producir, en el seno del nuevo mundo en interacción con el cual se desarrollaba, una coherencia nueva que haga honor a su doble ambición: comprender el mundo *y* actuar sobre él. El científico se ha encontrado reducido a una oscilación perpetua entre el mito científico y el silencio de la «seriedad científica», entre la afirmación del carácter absoluto y global de la verdad científica y el repliegue hacia una concepción de la teoría científica como simple receta pragmática que permite una intervención eficaz en los procesos naturales. Para la confusión cultural de nuestra época, las ciencias de la naturaleza han llegado a ser finalmente una realidad que parece escapar al análisis.

Simultáneamente, las otras actividades intelectuales, artes, filosofía, ciencias del hombre y de las sociedades, han perdido no solamente uno de los recursos más ricos de su inspiración, sino que, si quieren afirmar su originalidad propia, deben luchar para escapar al modelo, tanto más fascinante cuanto que permanece oscuro, de las ciencias de la naturaleza.

Lo hemos dicho, nuestra tesis es que la ciencia clásica ha alcanzado hoy sus propios límites; y uno de los aspectos de esta transformación teórica es, lo veremos más tarde, el descubrimiento de los límites de conceptos clásicos que implicaban, para aquellos que creían en su validez universal, la posibilidad de un conocimiento completo del mundo. Ya que si los seres omniscientes, diablillo de Laplace, de Maxwell, dios de Einstein, abundan todavía hoy en los restos científicos, no hay allí arcaísmo alguno, simple inocencia o «filosofía espontánea de sabio». El contenido teórico de la ciencia clásica ha contribuido, sin ninguna duda, a estabilizar el mito de un saber omnisciente. Es por lo que, por nuestro lado, utilizaremos referencias de este tipo, tanto para analizarles el contenido teórico como para estudiar lo que, hoy, las hace imposibles: representan para nosotros un

indicador muy seguro que permite identificar las teorías que pertenecen a esta ciencia clásica, de la cual las metamorfosis actuales significan el fin.

En la víspera de la síntesis newtoniana, John Donne lloraba al cosmos aristotélico destruido por Copérnico:

And new Philosophy calls all in doubt,
The Element of fire is quite put out,
The Sun is lost, and th'earth, and no man's wit
Can well direct him where to look for it.
And freely men confess that this world's spent,
When in the Planets and the Firmament,
They seek so many new, then they see that this
Is crumbled out again to his Atomies
'T is all in Pieces, all coherence gone [40].

En los trozos esparcidos y los bloques disjuntos que constituyen hoy nuestra cultura se descubre, como en la época de Donne, la posibilidad de una nueva coherencia. La ciencia clásica, la ciencia mítica de un mundo simple y pasivo, está muriendo, matada no por la crítica filosófica, no por la resignación empirista, sino por su mismo desarrollo.

Estamos en la actualidad en un punto de convergencia, al menos parcial, de las tentativas de abandonar el mito newtoniano sin renunciar a comprender la naturaleza. Vamos a mostrar que esta convergencia dibuja con claridad algunos temas fundamentales: se trata del tiempo, que la ciencia clásica describe como reversible, ligado únicamente a la medida del movimiento al cual aquélla reduce todo cambio; se trata de la actividad innovadora, la cual la ciencia clásica niega, oponiéndole el autómata determinista; se trata de la diversidad cualitativa sin la cual ni porvenir ni actividad son concebibles y que la ciencia clásica reduce a una simple apariencia. Pensamos que la ciencia de hoy escapa al mito newtoniano porque ha concluido *teó-*

---

[40] «La nueva filosofía pone todo en duda. El elemento del fuego está totalmente perdido, el sol está perdido y la tierra también, y ningún hombre sabe dónde buscarlo. Y los hombres proclaman sin reparo que este mundo está agotado cuando buscan tantas novedades en los planetas y en el firmamento, y ven entonces que todo está de nuevo pulverizado en átomos, todo está destrozado, ya no hay coherencia.» J. Donne, *An Anatomy of the World,* 1611.

ricamente en la imposibilidad de reducir la naturaleza a la escondida simplicidad de una realidad regida por leyes universales. La ciencia de hoy no puede ya adjudicarse el derecho de negar la pertinencia y el interés de otros puntos de vista, de negarse en particular a escuchar los de las ciencias humanas, de la filosofía y del arte.

Hemos hablado de resonancia entre los discursos científicos y teológicos. Hoy podemos hablar de otra resonancia, entre las ciencias y la dominación «laica» de un mundo industrializado, complementada por la afinidad que conocemos entre la puesta en funcionamiento de esta dominación y la práctica de limitada finura de la ciencia. Pensamos que, con la ciencia transformada, el diálogo cultural es de nuevo posible e, inseparablemente, que una nueva alianza puede formarse con la naturaleza en el porvenir de la cual participan el juego experimental y la aventura exploradora de la ciencia. Desde luego, esto no es más que una posibilidad. Si la ciencia misma invita hoy al científico a la inteligencia y a la apertura, si las coartadas teóricas al dogmatismo y al desprecio han desparecido, queda todavía la labor concreta, política y social, de crear los circuitos de una cultura.

Capítulo II
LA IDENTIFICACION DE LO REAL

1. *Las leyes de Newton*

Vamos ahora a penetrar en esta ciencia clásica para comprender sus puntos fuertes, aquello que, de la naturaleza, ha conseguido esclarecer de una vez por todas, y para comprender también sus debilidades, todo aquello que ha debido negar y que ahora se revuelve contra ella.

Un problema central, desde Galileo, podríamos casi afirmar que el problema central de la física, es el problema de la aceleración de los cuerpos; es pidiendo a la naturaleza cuentas de los cambios sufridos por el estado de movimiento y de reposo de los cuerpos como hemos conseguido obtener de ella respuestas matemáticas. Galileo ha descubierto que no debemos pedir a la naturaleza la *causa* de su estado de movimiento si éste es uniforme, ni tampoco pedirle la causa de su estado de reposo: el movimiento y el reposo se mantienen por sí mismos, eternamente, si nada viene a perturbarlos. Por el contrario, se le pedirán explicaciones por todo paso del reposo al movimiento, del movimiento al reposo, por todo cambio de velocidad. Sin embargo, no le preguntaremos por qué el cuerpo acelera; pregunta-

remos cómo se efectúa esta transformación para poder describirla, para poder enunciar su ley matemática.

La formulación de las leyes newtonianas del movimiento realiza la síntesis de dos desarrollos convergentes, el de la física —la descripción del movimiento, con las leyes de Kepler y las de la caída de los cuerpos formuladas por Galileo— y el de las matemáticas que culminan en el cálculo «infinitesimal».

¿Cómo describir una velocidad que varía de manera continua? ¿Cómo describir la evolución, instante a instante, de las diversas magnitudes, posición, velocidad, aceleración, que caracterizan el estado instantáneo de un móvil? Los matemáticos han introducido el concepto de cantidad infinitesimal para responder a estas preguntas. Una cantidad infinitesimal resulta de un *paso al límite*, es la variación de una magnitud entre dos instantes sucesivos cuando el intervalo entre estos dos instantes tiende a cero. La descripción infinitesimal puede así descomponer el cambio en una serie infinita de cambios infinitamente pequeños, mientras que, anteriormente, no se podía describirlo más que como el resultado de un número finito de transiciones de magnitud finita yuxtapuestas como las perlas de un collar.

En cada instante la descripción del estado de un móvil comprenderá no solamente su posición, que llamaremos r, sino también su «tendencia instantánea» a cambiar de posición, es decir, su velocidad V en este instante, y su tendencia a modificar esta velocidad, es decir, su aceleración a. Velocidad y aceleración instantáneas son «conceptos límites» que miden una variación instantánea como el cociente entre dos cantidades infinitesimales: entre la variación de la magnitud posición o velocidad, durante un intervalo de tiempo Δt que tiende hacia cero y el mismo intervalo Δt. Se denomina a tales magnitudes «derivadas con respecto al tiempo». Se escribe, desde Leibniz, $v=dr/dt$. En cuanto a la aceleración, $a=dv/dt = d^2r/dt^2$ derivada de una derivada, es una *derivada* «segunda».

El problema sobre el cual se concentra la física newtoniana es el cálculo de la derivada segunda, de la aceleración sufrida en cada instante por los diferentes puntos de un sistema material. El movimiento de cada uno de estos puntos durante un intervalo de tiempo finito será entonces calculable por *integración*, es decir, sumación de las variaciones infinitesimales de velocidad sufridas durante este intervalo. El caso más simple es aquel en el que a es una constante (así, por ejemplo, para la caída de un cuerpo, a es la constante gravitacional g). Generalmente, la misma aceleración varía a lo largo del tiempo y el tra-

bajo del físico es precisamente el determinar la naturaleza de esta variación.

En lenguaje newtoniano, estudiar la aceleración es determinar las diferentes «fuerzas» que actúan sobre los puntos del sistema estudiado. Lo que llamamos tradicionalmente la segunda ley de Newton, $F=ma$, expresa la proporcionalidad en cada instante entre fuerza aplicada en un punto y la aceleración que ésta genera. Esta equivalencia entre fuerza y aceleración da la versión matemática de la estructura causal que le es propia al mundo de la dinámica: mundo en el cual nada se produce, en donde ningún movimiento empieza, varía o termina si no es como efecto de una fuerza, y esto en cada instante.

En el caso de un sistema de puntos materiales, el problema se complica por el hecho de que en cada instante los valores de las fuerzas aplicadas varían en función de las aceleraciones que estas fuerzas determinaron en el instante *precedente*. Las fuerzas estudiadas por la física newtoniana son, en efecto, función de la configuración espacial de sistemas de cuerpos entre los cuales ellas actúan y, por tanto, varían cuando las distancias entre estos cuerpos varían.

Un problema dinámico se define bajo la forma de un sistema de ecuaciones diferenciales; el estado instantáneo de cada uno de los puntos del sistema queda descrito por su velocidad y su aceleración, es decir, por derivadas primeras y segundas. Este sistema de ecuaciones describe la siguiente situación: en cada instante, un conjunto de fuerzas, función de la distancia entre los puntos del sistema (y en consecuencia función de r) genera una aceleración particular dv / dt para cada uno de estos puntos; el conjunto de estas aceleraciones determina a su vez la modificación de las distancias entre los puntos y, consecuentemente, las resultantes del conjunto de las fuerzas que actúan en el instante siguiente.

Mientras que el conjunto de estas ecuaciones diferenciales *define* el problema dinámico, su «integración» constituye la *solución*. La integración de las ecuaciones del movimiento lleva al cálculo del conjunto de *trayectorias* $r(t)$ de los puntos del sistema. Las trayectorias espacio-temporales de un conjunto de puntos en interacción contienen la totalidad de la información que la dinámica reconoce como pertinente; constituyen la descripción completa del sistema dinámico.

Toda descripción dinámica implica, por tanto, dos tipos de datos empíricos: por una parte, *la descripción de las posiciones y de las velocidades* de cada uno de los puntos de un sistema en un *instante dado*, a menudo llamado instante inicial, ya que la integración de las

ecuaciones dinámicas desplegará a partir del «estado inicial» así descrito la sucesión de los estados, es decir, el conjunto de las trayectorias puntuales; por otra parte, *la naturaleza de las fuerzas dinámicas*, es decir, la manera en la cual las aceleraciones instantáneas que generan pueden ser deducidas del estado instantáneo del sistema

En lo que concierne al segundo punto, sabemos que el triunfo de la ciencia newtoniana es el descubrimiento de que una sola fuerza, la fuerza de gravitación, determina el movimiento de los planetas, de los cometas y de los cuerpos que caen sobre la tierra. Cualquiera que sea el par de cuerpos materiales, su distancia y sus respectivas masas, el sistema newtoniano implica que una fuerza de atracción los une, que se ven atraídos el uno hacia el otro por esta fuerza, proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

La dinámica newtoniana se presenta entonces como doblemente universal. La definición de la ley de gravitación que describe cómo las masas tienden a acercarse las unas con respecto a las otras no contiene ninguna referencia a la escala de los fenómenos. Se aplica igualmente al movimiento de los átomos, al de los planetas y al de las estrelllas de una galaxia: todo cuerpo, cualquiera que sea su dimensión, tiene una masa, es decir, se ve sometido a las fuerzas de interacción newtonianas. Por otra parte, si definimos un sistema dinámico por el hecho de que el movimiento de cada uno de sus puntos queda determinado en cada instante por la posición y la velocidad del conjunto de puntos materiales que lo constituyen, el único sistema dinámico, hablando rigurosamente, es el universo en su conjunto. Ya que los cuerpos interaccionan en el universo, cualquiera que sea la distancia que los separa, los sistemas dinámicos locales, tales como el sistema planetario, no pueden definirse más que por aproximación, despreciando el conjunto de fuerzas pequeñas con respecto a aquellas de las cuales calculamos el efecto.

Insistamos en este punto: cualquiera que sea el sistema dinámico, la forma de las leyes del movimiento, $F= ma$, permanece válida. Otros tipos de fuerzas diferentes de la fuerza de gravitación podrían ser descubiertos —y efectivamente han sido descubiertos: las fuerzas de atracción y de repulsión eléctricas, por no citar más que éstas—, y vendrían entonces a modificar el contenido empírico de las leyes del movimiento; no modificarían *la forma*, que define lo que, fundamentalmente, es el mundo de la dinámica, lo que significa la reducción del cambio a un conjunto de trayectorias. Este significado que-

da contenido en los tres atributos de la trayectoria mecánica: *la legalidad, el determinismo, la reversibilidad.*

La ley dinámica que rige la trayectoria deduce el conjunto de las aceleraciones instantáneas de las fuerzas de interacción entre los puntos del sistema. Por tanto supone, determinada la naturaleza de las fuerzas, la manera en la cual éstas varían con la distancia entre estos puntos. Sin embargo, la ley dinámica no basta para describir tal o cual evolución dinámica particular, sino solamente para definir todas las evoluciones posibles. Para calcular una trayectoria es necesario adjuntar al conocimiento de la ley del movimiento el conocimiento empírico de un estado instantáneo cualquiera del sistema. La ley general deduce el sistema, tal como un razonamiento lógico deduce la conclusión a partir de las premisas. Es destacable que, siendo conocida la ley, cualquier estado particular basta para definir enteramente el sistema y no solamente su evolución futura, sino también aquélla, perteneciente al pasado, que ha finalizado en ese estado. En consecuencia, en cada instante todo viene dado. La dinámica define todos los estados como equivalentes, ya que cada uno permite determinar todos los demás, predecir la totalidad de las trayectorias que constituyen la evolución del sistema.

«Todo viene dado», esta expresión a menudo meditada por Bergson resume la dinámica y la realidad que ésta describe; todo viene dado por el dato inicial; la ley general de evolución dinámica no permite ninguna predicción particular en tanto que uno de los estados del sistema no esté definido; en cuanto lo está, la ley determina completamente el sistema, permite deducir su evolución y calcular su estado en cualquier instante anterior o posterior.

Todo viene dado, pero también todo es posible. El ser que tuviera el poder de manipular el sistema dinámico tiene la libertad de imaginar para este sistema cualquier estado; desde el momento que este estado es compatible con la definición dinámica del sistema, es posible calcular un estado inicial tal que el sistema llegue «espontáneamente» al estado escogido en el momento escogido. A la generalidad de las leyes dinámicas responde la arbitrariedad de las condiciones iniciales y, consecuentemente, la arbitrariedad de las evoluciones particulares.

La *reversibilidad* de la trayectoria dinámica fue, en lo que a ella se refiere, implícitamente afirmada por todos los fundadores de la dinámica, y entre otros por Galileo y Huyghens: cada vez que querían poner en evidencia la relación de equivalencia entre causa y efecto so-

bre la cual deseaban fundar su descripción matemática del movimiento, evocaban una operación imaginaria que podemos ilustrar con una pelota perfectamente elástica que rebota sobre el suelo; imaginaban la inversión instantánea de la velocidad del móvil estudiado y describían su retorno hacia la posición inicial con restauración simultánea de lo que había producido el movimiento acelerado entre el instante inicial y el instante de inversión. La pelota, por ejemplo, remonta a su altura inicial.

La dinámica hace de la reversibilidad la propiedad de toda evolución dinámica. El antiguo experimento imaginario era de hecho la escenificación de una propiedad matemática general de las ecuaciones dinámicas: la estructura de estas ecuaciones implica que si las velocidad de todos los puntos de un sistema son instantáneamente invertidas, todo ocurre como si el sistema «recorriera el tiempo en sentido inverso». Recorre de hecho en sentido inverso todos los estados por los cuales su evolución anterior lo ha hecho pasar. La dinámica define como *matemáticamente equivalentes* las transformaciones de $t \rightarrow -t$, es decir, la inversión del sentido de recorrido del tiempo, y $v \rightarrow -v$, la inversión de las velocidades. Lo que una evolución dinámica ha realizado, otra evolución, definida por la inversión de las velocidades, puede deshacerlo y restaurar una situación idéntica a la situación inicial.

Esta última propiedad de reversibilidad de la dinámica conduce a una dificultad cuyo carácter fundamental no se impondrá más que con la mecánica cuántica. Toda intervención, manipulación, medida es, en esencia, irreversible. En consecuencia, la ciencia *activa* se encuentra, por definición, extraña al mundo reversible que ella describe, cualquiera que sea, por otra parte, el grado de plausibilidad intrínseca de tal descripción. Sin embargo, igualmente desde este último punto de vista, la reversibilidad puede ser tomada como símbolo de la extrañeza del mundo descrito por la dinámica. Cualquiera conoce la impresión de absurdo que provocan las películas proyectadas al revés, el espectáculo de una cerilla que reconstituye su llama, aquellos tinteros rotos que se vuelven a formar y retornan sobre la mesa después de que la tinta se ha vuelto a concentrar, aquellos ramos que rejuvenecen hasta transformarse otra vez en capullos. El mundo dinámico define tales evoluciones como posibles, en pie de igualdad con sus inversas, que nosotros conocemos.

2. *Movimiento y futuro*

Sabemos que Aristóteles había hecho del tiempo la medida del cambio. Pero también había reconocido la multiplicidad cualitativa de los cambios de la naturaleza. Para la dinámica, igualmente, el tiempo es la medida del cambio: es el parámetro en función del cual la ley despliega sus efectos, despliega la sucesión infinita de estados dinámicos. Pero el tiempo —medida de la dinámica— no es un tiempo general, común al conjunto de las evoluciones cualitativamente distintas, cada una poseyendo su propia razón, su propio ritmo; el tiempo dinámico constituye no solamente una medida del futuro, sino el mismo futuro dinámico, al cual postulamos, se reduce en principio el conjunto de los procesos naturales. La diversidad cualitativa de los cambios se ve reducida al correr homogéneo y eterno de un tiempo único, *medida* pero también *razón* de todo proceso. ¿Cómo comprender esta nueva concepción del porvenir natural?

Es interesante introducir este problema comparando el futuro dinámico con la concepción atomista del cambio, muy potente en el momento en que Newton formulaba sus leyes. De hecho, parece ser que no solamente Descartes, Gassendi y d'Alembert, sino el mismo Newton, pensaban que las colisiones entre átomos duros constituían una fuente última, incluso la única, del cambio de movimiento [1]. Sin embargo, la descripción dinámica que aquellos que hemos citado han contribuido a fundar, se opone casi punto por punto a la que deriva de la hipótesis atomista.

Al carácter continuo de la aceleración descrita por las ecuaciones dinámicas se opone el choque discontinuo, colisión instantánea entre partículas duras, en el cual Newton había ya notado el hecho que, en contradicción con la dinámica, conlleva una pérdida de movimiento irreversible. La única colisión reversible, es decir, la única que está de acuerdo con las leyes de la dinámica, es la colisión elástica. Pero

[1] Sobre este punto, véase T. Hankins, «The Reception of Newton's Second Law of Motion in the Eighteenth Century», en *Archives internationales d'Histoire des Sciences*, vol. XX, 1967, pp. 42-65; B. I. Cohen, «Newton's second Law and the Concept of Force in the Principia», en *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton, Tricentennial Celebration, The Texas Quarterly*, vol. X, núm. 3, pp. 125-127. Los cuatro párrafos que siguen se inspiran, en lo que concierne al problema del atomismo y de la conservación, en W. L. Scott, *The Conflict between Atomism and Conservation Theory*, Londres, MacDonald, 1970.

¿cómo atribuir la compleja propiedad de elasticidad a los átomos de los cuales pretendemos hacer los primeros elementos de la naturaleza?

Por otra parte, y en un plano menos técnico, a la ley general del movimiento dinámico se opone el carácter aleatorio generalmente atribuido a las colisiones entre átomos. Los filósofos de la Antigüedad ya habían subrayado el hecho de que cada proceso natural, interpretado en términos del movimiento y de las colisiones de los átomos en el vacío, puede ser objeto de múltiples explicaciones, todas plausibles, todas diferentes. Lo que poco importa al filósofo atomista al ser su meta, ante todo, el demostrar la suficiencia de este tipo de explicación, la inutilidad de recurrir a lo sobrenatural, es el describir un mundo sin Dios ni normas, un mundo en donde el hombre es libre y no tiene por qué esperar castigo o recompensa de ningún tipo, divino o natural. Pero ¿qué relación hay entre este mundo mortal, este mundo inestable en donde, sin pausa alguna, los átomos se unen y se deshacen, los seres nacen y mueren y el mundo inmutable de la dinámica, regido por una fórmula matemática única, verdad eterna desplegándose en un mundo futuro tautológico? La ciencia moderna, ciencia de ingenieros y astrónomos, es una ciencia de intervención y de previsión, a la que el convencimiento general de que todo es explicable por los átomos no puede bastarle. La ley matemática constituye la posibilidad concreta de prever y de manipular. La naturaleza será legal, sometida y previsible, y no caótica, irregular, estocástica.

Volveremos a encontrar en el siglo XX el contraste entre el determinismo legal y el acontecimiento aleatorio que, tal como lo ha mostrado Koyré, había atormentado a Descartes [2]. En efecto, desde el final del siglo XIX, con la teoría cinética de los gases, el caos de los átomos ha vuelto a la física: se ha visto que el comportamiento caótico de una población numerosa, tal como la de las moléculas de un gas, es el comportamiento previsible por excelencia. Desde entonces, el problema de la relación entre la ley dinámica y la descripción estadística se transforma en uno de los problemas centrales de la física y constituye la clave de la renovación actual de la dinámica (véase *infra*, libro III).

Sin embargo, en el siglo XVIII el enfrentamiento parecía no tener salida, lo que, dicho sea de paso, contribuye a explicar el escepticismo de la mayoría de los físicos *de esta época* en lo que se refiere al

[2] A. Koyré, *Etudes galiléennes*, pp. 127-136.

alcance efectivo de la descripción dinámica. En efecto, estos físicos sabían que la descripción dinámica infinitesimal dejaba en la sombra el proceso de colisión, para ellos la única fuente inteligible del cambio de movimiento. Sabían también que en la naturaleza, en cuanto hay un choque, rozamiento, contacto brusco entre cuerpos de diferentes velocidades, algo de movimiento se pierde, por lo que concluían que, en estos casos no ideales, la energía no se conserva (véase también capítulo IV, 3). Les era imposible, tanto a los atomistas como a los ingenieros preocupados con el rendimiento, ver en la dinámica algo más que una idealización, un modelo parcial expresado en un lenguaje coherente. Así pues, los físicos del continente se han resistido durante mucho tiempo a las seducciones del newtonianismo. Notemos que la victoria de esta doctrina en Francia coincide, y no es un azar, con la separación profesional entre físicos e ingenieros, que favorecieron las instituciones académicas post revolucionarias.

Pero ¿dónde encontrar las raíces de la síntesis newtoniana y de su concepción del cambio? Síntesis[3] entre la ciencia de las máquinas ideales, en donde el movimiento se transmite entre piezas ya en contacto, sin choques ni rozamientos, y la ciencia de los astros que interaccionan a distancia, esta evolución se ha formado en contra del atomismo, la ciencia del azar y de las colisiones. ¿Debemos por ello dar la razón a aquellos que creen que la dinámica newtoniana, con el hecho de atribuir a las interacciones a distancia la responsabilidad exclusiva de todos los procesos naturales, representa una novedad real, una ruptura radical en la historia del pensamiento? Es lo que la historia positivista ha querido siempre hacernos creer cuando nos cuenta cómo Newton tuvo la valentía de inducir, del estudio matemático del movimiento planetario y de las leyes de la caída de los cuerpos la acción de una «fuerza» que permitía dar una formulación común a fenómenos que en principio no tenían ninguna relación entre sí. La verdad histórica parece, sin embargo, menos conforme con las normas positivas. Fue casi totalmente ignorada por los contemporáneos de Newton, a los que habría escandalizado.

¿Qué habrían dicho los que, en el continente, acogían no sólo con sospechas, sino con indignación esta «fuerza» extrañamente similar a

---

[3] En su obra sobre la historia de la mecánica *(Die Mechanik in Ihrer Entwicklug)*, Mach ha insistido sobre la doble filiación de la dinámica moderna: ciencia de las trayectorias y ciencia de los balances.

las cualidades ocultas, a las preferencias y a las atracciones de la antigua física? ¿Qué habrían dicho los defensores de la racionalidad y del rigor mecanicista si hubieran conocido la extraña historia de la fueza newtoniana? Ya que, detrás de las prudentes declaraciones de Newton (no habrá ninguna hipótesis en lo que se refiere a la naturaleza de las fuerzas), se disimulará la pasión de un alquimista [4]. Paralelamente a sus estudios matemáticos, Newton había estudiado durante treinta años los antiguos escritos alquimistas y explorado en estudios minuciosos y enconados de laboratorio la posibilidad de realizar la gran obra, la síntesis del oro.

La síntesis newtoniana, la unificación del cielo y la tierra fue la obra no de un astrónomo, sino de un químico. Lo que inspiró la fuerza newtoniana que anima a la materia inerte y que constituye en su sentido más fuerte la actividad de la naturaleza, parecen ser las fuerzas que el químico Newton observó entre los cuerpos, fuerzas de atracción, de repulsión que regulan la «vida social» de la materia, fuerzan a todo cuerpo a formar pares estables con otros, a provocar por repulsión la disolución de los compuestos, a servir de mediadores [5] que permiten el acercamiento y el acoplamiento de otros cuerpos.

Cierto es que el estudio de las trayectorias celestes jugó un papel decisivo. Al principio, hacia 1679, Newton parece haber tenido como solo objetivo encontrar en este estudio la acción de nuevas fuerzas atractivas, *análogas* a las fuerzas químicas, más simples de estudiar matemáticamente. Aproximadamente seis años más tarde este estu-

[4] Es lo que han concluido los historiadores contemporáneos que han comenzado el estudio de la impresionante masa de «notas alquimistas» de Newton, ignoradas y despreciadas como «no científicas» hasta ahora. Lord Keynes, quien ha jugado un papel decisivo en su recolección, resume el choque que supuso su descubrimiento: «Newton no fue el primero de la Era de la Razón. Fue el último de los magos, el último babilonio o sumerio, el último gran espíritu que haya contemplado el mundo visible y el mundo intelectual con los mismos ojos que aquellos que comenzaron a construir nuestra herencia intelectual hace poco menos de diez mil años»; citado por B. J. Dobbs, *The Foundations of Newton's Alchemy*, Cambridge, University Press, 1975, p. 13; R. S. Westfall, «Newton and the Hermitic tradition», en *Science, Medicine and Society*, ed., A. G. Debus, Londres, Heinemann, 1972, y R. S. Westfall, «The Role of Alchemy in Newton's Career», en *Reason, Experiment and Mysticism*, ed. M. L. Righini Bonelli y W. R. Shea, Londres, MacMillan, 1975.

[5] Dobbs *(op. cit.*, pp. 204-210) estudia el papel del «mediador», este «tercer cuerpo» que hace sociables a los otros dos cuerpos. A este propósito, recordaremos la importancia del personaje del mediador en *Las afinidades electivas* de Goethe, no tan alejado de Newton en lo que a la química respecta.

dio matemático había llegado a una conclusión inesperada: no solamente hay similitud entre las fuerzas que unen los planetas y aquellas que aceleran la caída de los cuerpos, hay identidad; la atracción no es específica de cada planeta, es la misma, ya se trate de la Luna alrededor de la Tierra, de los planetas, o incluso de los cometas que atraviesan el sistema solar. Newton buscaba en el cielo fuerzas análogas a las fuerzas químicas, a las afinidades que constituyen propiedades específicas, diferentes para cada compuesto químico, confiriendo a cada uno una actividad cualitativamente diferenciada. Sin embargo, descubrió una ley universal cuya validez confirmó para todos los fenómenos químicos, mecánicos, celestes.

La síntesis newtoniana no es, pues, una ruptura, es una *sorpresa.* Es un descubrimiento inesperado, trastornador, que la cultura conmemora haciendo de Newton el símbolo mismo de la ciencia moderna. Esta ciencia suponía un orden universal, suponía que un método laborioso de medida de experimentación podría descubrir la verdad del mundo. Y he aquí que de hecho la naturaleza se deja explicar, que responde más allá de las esperanzas de aquél que la interrogaba.

Durante mucho tiempo esta prolijidad repentina de la naturaleza, este triunfo del «Moisés» inglés constituyó una especie de escándalo intelectual para los racionalistas del continente. La obra de Newton fue aceptada como un descubrimiento puramente empírico, cuya refutación empírica no sorprendería demasiado a nadie. Así es como en 1747 Euler, Clairaut y d'Alembert, sin duda los más grandes hombres de ciencia de la época, llegan a la misma conclusión: Newton se ha equivocado, para describir el movimiento de la Luna es necesaria una fórmula matemática de la fuerza de atracción más compleja, hacer la suma de dos términos. Desde ese momento y durante dos años, todos creen que al fin la naturaleza ha desmentido a Newton y esta creencia es fuente de excitación, pero no de desesperación. Muy lejos de identificarla con la ciencia física misma, los físicos consideran sin demasiados remordimientos el renunciar al descubrimiento newtoniano. D'Alembert llega hasta mostrar escrúpulos en la búsqueda de otras pruebas en contra de Newton, a «darle la patada del asno» [6].

Uno solo había tenido la audacia de elevarse en contra del veredicto de los físicos, de protestar contra la ligereza con la que los físicos proponían abandonar la universalidad de la fuerza de gravita-

[6] La historia del «error» de Newton viene contada por Hankins *(Jean d'Alembert, Science and Enlightment,* pp. 29-35).

ción; este newtoniano convencido era Buffon, que escribía en 1748: «Una ley en física no es ley más que porque su medida es simple y la escala que la representa no es solamente siempre la misma, sino que además es única... El señor Clairiaut ha propuesto una dificultad en contra del sistema de Newton, pero no es más que una dificultad que no debe ni puede convertirse en un principio, es necesario buscar cómo resolverla y no hacer de ella una teoría cuyas consecuencias no se apoyan más que sobre un cálculo; ya que, como he mencionado, se puede representar todo con un cálculo y no llegar a nada; y si permitimos añadir uno o varios términos a una ley física, como lo es la de la atracción, no añadimos más que arbitrariedad en lugar de representar la realidad [7].»

Más tarde, Buffon proclamaría lo que llegaría a ser bien pronto, pero por poco tiempo, el programa de investigación de la química: «Las leyes de afinidad por las cuales las partes constituyentes de las diferentes sustancias se separan de las otras para recombinarse entre ellas y formar materias homogéneas son las mismas que la ley general por la cual todos los cuerpos celestes actúan los unos sobre los otros: se ejercen de la misma forma y en las mismas relaciones de masas y distancias; un globo de agua, de arena o de metal actúa sobre otro globo como el globo de la tierra actúa sobre el de la Luna; y si hasta hoy hemos mirado las leyes de la afinidad como diferentes de las de la gravitación, es por no haberlas concebido bien, no haberlas entendido bien, es por no haber arropado este objeto en toda su extensión. La figura que, en los cuerpos celestes, no contribuye nada o casi nada a la ley de la acción de los cuerpos los unos sobre los otros, porque la distancia es muy grande, hace al contrario casi todo cuando la distancia es muy pequeña o nula... Nuestros sobrinos podrán, con la ayuda del cálculo, abrirse camino en este nuevo campo de conocimientos» [8], es decir, deducir de la figura de los cuerpos elementales su ley de interacción.

La historia dio la razón al naturalista, para quien la fuerza no era un mero artífice matemático, sino el fundamento de una nueva cien-

---

[7] G. L. Buffon, *Réflexions sur la loi d'attraction*, apéndice a *Introduction á l'Histoire des Minéraux*, publicada en 1774, tomo IX de las *Oeuvres complétes*, París, Garnier Fréres, pp. 75 y 77.

[8] G. L. Buffon, *Histoire Naturelle. De la Nature, Seconde Vue*, 1765, citado por H. Metzger, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique*, París, Blanchard, 1974, pp. 57-58.

cia de la naturaleza: los físicos tuvieron que reconocer el error cometido. Cincuenta años más tarde, Laplace pudo escribir el *Sistema del Mundo*, la ley de la gravitación universal había resistido victoriosamente, los numerosos casos en los cuales parecía refutada se habían transformado en demostración brillante de su vitalidad y de su fecundidad. Paralelamente, y en particular bajo la influencia de Buffon, los químicos franceses volvían a descubrir la extraña analogía entre la atracción física y las afinidades químicas [9]; a pesar de los sarcasmos de d'Alembert, Condillac, Condorcet, cuyo racionalismo riguroso se acomodaba mal a esas «analogías» oscuras y estériles, rehacían en sentido contrario el recorrido de Newton, de los astros a la materia.

A principios del siglo XIX, el programa newtoniano, la reducción del conjunto de los fenómenos físico-químicos a la acción de las fuerzas —algunos han añadido a la atracción de la gravedad la fuerza repulsiva del calor que dilata los cuerpos y facilita la disolución, así como las fuerzas eléctricas y magnéticas—, llegó a ser el programa oficial del grupo científico más potente y prestigioso: la escuela de Laplace que domina el mundo científico en el momento en que el Imperio domina Europa [10].

A principios del siglo XIX se crean lar grandes escuelas francesas y la Universidad se reorganiza. Es el momento en el cual los hombres de ciencia llegan a ser profesores e investigadores profesionales y a quienes es sistemáticamente confiada la formación de sus suceso-

---

[9] A. Thackray describe esta conversión en buffonianos de una parte de los químicos franceses en *Atoms and Power, An Essay on Newtonian Matter and the Development of Chemistry*, Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press, 1970, pp. 199-223. *La Statique chimique* de Berthollet constituye la clausura y coronación del programa buffoniano en química; los alumnos de Berthollet abandonaron el conjunto de conceptos por los cuales este último había hecho de un proceso de reacción química una transformación compatible con las exigencias de la ciencia de las fuerzas y de las trayectorias y, en especial, la idea de que la asociación química en proporciones definidas constituye un caso particular y no la regla. ¿Cómo habrían podido las fuerzas newtonianas explicar que dos átomos se asocien, sin que un tercero, también atraído, tome parte en esta asociación?

[10] No se trata aquí de explicar ni el triunfo del newtonianismo en Francia, ni su caída, sino de subrayar algunos puntos, y en primer lugar la correlación al menos cronológica, entre estos acontecimientos y diversas etapas de profesionalización de la ciencia en Francia. Véase M. Crosland, *The Society of Arcueil, a View of French Science at the Time of Napoleon*, Londres, Heinemann, 1960, así como su biografía de Gay-Lussac, en Cambridge University Press, 1978.

res[11]. El saber intenta sintetizarse, unificarse en manuales y en trabajos de divulgación. La ciencia no se discute ya en los salones, se enseña o se difunde; ya no es objeto de críticas, ni está sometida a los intereses mundanos [12], es objeto de consenso; y este consenso, como hemos visto en el capítulo anterior, fue primeramente newtoniano. Podríamos decir que Buffon ha triunfado sobre el Siglo de las Luces.

Un siglo después de la apoteosis de Newton en Inglaterra, el énfasis de los versos del hijo de Ampére hace eco al del epitafio de Pope [13]:

Du Christ de la science annonçant la venue,
Kepler, du tabernacle avait ouvert la nue;
Alors, du dieu voyant adoré par Platon,
La verbe se fit homme, il s'appela Newton.
Il vint, il révéla le principe suprême,
Constant, universel, un comme Dieu lui même.
Les mondes se taisaient, il dit: ATTRACTION.
Ce mot, c'était le mot de la création.

Por breve tiempo, pero que marcará a los científicos de una nostalgia duradera, la ciencia triunfó, reconocida y honrada por un estado poderoso, poseedora de una concepción global y coherente del

---

[11] Sabemos que Thomas Kuhn ha hecho de esta función de las instituciones científicas modernas de encargarse de la formación de futuros investigadores, es decir, de asegurar su propia reproducción, una característica fundamental de la actividad científica tal como la conocemos desde el siglo XIX en adelante. Estos problemas ya empiezan a ser estudiados por los historiadores de la ciencia, véanse los estudios de M. Crosland, R. Hahn y W. Farrar en *The Emergence of Science in Western Europe*, ed. M. Crosland, Londres, MacMillan, 1975.

[12] Gaston Bachelard concede una gran importancia a este aislamiento del «cuerpo científico», del cual hace un progreso decisivo; podríamos incluso adelantar que en este sentido toda su obra tiene por eje esta puesta a punto institucional y sus consecuencias en el orden de los conocimientos, desde la ciencia mundana *(La Formation de l'esprit scientifique)* hasta la «ciudad científica» *(Le Rationalisme appliqué)*. Más allá de las dimensiones fácilmente ridiculizables de las discusiones de salón, la apertura de la ciencia del siglo XVIII, la multiplicación de los círculos académicos, la práctica no profesional de una tarea de investigación curiosa y crítica, podría servirnos de fuente de inspiración bien necesaria en los tiempos actuales.

[13] Citado en Schlanger, J., *Les Métaphores de l'organisme*, París, Vrin, 1971, p. 108.

mundo. Newton, venerado por Laplace, llegó a ser el símbolo, la expresión misma de la verdad de esta ciencia de la edad de oro, del feliz momento en que los científicos fueron identificados y se reconocieron a sí mismos como los participantes de una empresa colectiva, mantenida y alentada por la sociedad y fundada sobre una fecunda unanimidad teórica.

El programa de Laplace murió con el Imperio, desbordado por el descubrimiento de numerosos fenómenos que fue incapaz de asimilar. ¿Podemos decir por tanto que el mecanismo está muerto, que el mundo newtoniano está abandonado? Es verdad que un cierto mecanicismo elemental ha muerto —estaba ya muerto con el reemplazo de los conceptos geométricos, por los conceptos infinitesimales y con la introducción de fuerzas actuando a distancia. En este sentido, el mecanicismo no ha parado de morir a cada trastorno de las ciencias físicas; lo que significa que nos ha sobrevivido a todos, espectro renaciente sin cesar, exorcizado de nuevo sin cesar.

¿Qué significan hoy, después de la teoría de los campos, la relatividad, la mecánica cuántica, la síntesis newtoniana? Es un problema complejo sobre el que tendremos que volver. Sabemos hoy que la naturaleza no es siempre conforme a ella misma. En el dominio de lo microscópico, las leyes de la mecánica cuántica reemplazan a las de la mecánica clásica. Lo mismo que a escala del Universo, la física relativista toma el relevo de la física newtoniana. Sin embargo, ésta queda como punto de referencia por excelencia, siempre válida a nuestra escala. Podemos incluso decir que en el sentido en que la hemos definido, descripción de trayectorias deterministas, reversibles, estáticas, la dinámica newtoniana permanece en el corazón de la física. Además, ha constituido el terreno de predilección de los más grandes matemáticos y físicos (entre ellos Hamilton, Poincaré). Así es como ha llegado a ser un lenguaje formal, coherente y abstracto y en tanto que tal es como vamos ahora a descubrirla y hacer explícita la concepción del cambio que presupone.

3. *El lenguaje de la dinámica*

La formalización de la dinámica responde en primer lugar a esta exigencia: descubrir el «buen» conjunto de variables que define el sistema de manera tal que la descripción tenga la máxima sencillez y economía, tal que los principios de la dinámica y en particular el *prin-*

cipio de conservación de la energía, puedan aparecer con toda claridad.

El principio de conservación de la energía, de conservación de la suma de las energías potencial y cinética, constituye la traducción, bajo la forma de regla sintáctica del lenguaje dinámico, de lo que había sido evidente en la base de la ciencia moderna de las máquinas simples (véase capítulo I, 4): en el mundo idealizado, sin choque ni rozamiento, el rendimiento de las máquinas es igual a uno, el dispositivo realizado por una máquina se limita a transmitir íntegramente el movimiento que recibe. La máquina a la cual se confiere una cierta cantidad de energía potencial (resorte tenso, peso elevado, aire comprimido, etc.) produce un movimiento correspondiente a una cantidad igual de energía cinética. Esta es a su vez exactamente suficiente para restituir a la máquina la energía potencial utilizada en la producción del movimiento.

El caso más simple es aquel en donde la única fuerza a tomar en consideración es la fuerza de gravitación, siendo el caso de las máquinas simples (poleas, palancas, tornos, etc.). En ese caso, una relación global de equivalencia entre causa y efecto es fácil de establecer; sólo la altura descendida por el cuerpo en un instante dado determina la velocidad adquirida durante esta bajada. Ya la caída del cuerpo de masa m sea vertical, ya siga un plano inclinado o un recorrido en montaña rusa, de cualquier forma la velocidad (v) que adquiere y la energía cinética $(mv^2 / 2)$, no dependen más que del desnivel, h, recorrido $(v = \sqrt{2gh})$ y hacen al cuerpo capaz de volver a subir a su altura inicial (cualquiera que sea, una vez más, el camino seguido); el trabajo contra la fuerza de gravitación que una subida tal implica, restituye al sistema la energía potencial, mgh, que su caída le había hecho perder. Pensemos igualmente en el movimiento pendular, en el curso del cual las energías cinética y potencial se agotan alternativamente y alcanzan, alternativamente también, valores máximos.

Naturalmente, cuando se trata no ya de un cuerpo gravitatorio y de la Tierra, sino de un sistema de cuerpos en interacción, la equivalencia reversible entre causa productora y efecto producido es menos fácil de visualizar; en cada instante, la distancia entre las masas del sistema y, en consecuencia, las fuerzas de interacción entre esas masas y, en consecuencia, la aceleración de cada punto del sistema, varían. La aceleración en cada punto, al igual que la variación de energía potencial provocada por esta aceleración, es función, en cada instante, *del estado global del sistema.* La trayectoria seguida por cada uno de los puntos refleja y expresa, desde un punto de vista local, la

evolución global del sistema. Es, consecuentemente, a nivel global como puede establecerse la equivalencia reversible entre causa y efecto. En cada instante, la variación global de energía cinética, balance de las aceleraciones sufridas en cada punto del sistema, compensa exactamente la variación de la energía potencial, determinada por el conjunto de las variaciones de las distancias entre los puntos del sistema. De aquí ese principio dinámico fundamental: la evolución dinámica del sistema aislado conserva la energía de ese sistema.

La energía potencial (o «potencial», tradicionalmente simbolizado por V), que depende de las posiciones relativas de los puntos materiales, constituye una generalización de la magnitud que permitía a los mecánicos medir el movimiento que una máquina podía ser capaz de producir después de una transformación impuesta a su configuración espacial (por ejemplo, un cambio de altura de una masa m perteneciente a la máquina confiere a esta máquina una energía mgh). Pero la energía potencial no solamente permite a los ingenieros el hacer balances. Permite también describir el conjunto de las fuerzas aplicadas en cada instante en los diferentes puntos del sistema: en cada uno de los puntos la derivada del potencial respecto a una coordenada espacial q mide la fuerza aplicada en ese punto en la dirección de esta coordenada. Desde este momento, las leyes newtonianas del movimiento pueden formularse adoptando no ya la fuerza, sino la función potencial como magnitud central: la variación en cada instante de la velocidad de una masa puntual (o del momento, p, producto de la masa por la velocidad) se mide por la derivada del potencial por la coordenada q de esta masa.

El siglo XIX iba a generalizar la descripción dinámica introduciendo en particular una nueva función, la función hamiltoniana H, que es simplemente suma de las energías potencial y cinética del sistema, pero expresada en términos de lo que se llama «variables canónicas». Las ecuaciones dinámicas que definen un problema en el espacio «intuitivo» en función de las posiciones y de las derivadas con respecto al tiempo de las posiciones tienen la misma diversidad que esos problemas; las ecuaciones *canónicas*, en lo que a ellas atañe, permiten rebasar esta particularidad y formular todos los problemas dinámicos bajo una forma idéntica. La descripción canónica del problema dinámico es muy abstracta: ya no implica desde un primer momento involucrar las posiciones y las velocidades derivadas de las posiciones. Las variables canónicas q y p (llamadas por analogía con la posición q y el momento $p=m\ dq/dt$, coordenadas de posición y de

momento) se definen como magnitudes *independientes la una de la otra*. El momento canónico ya no puede ser calculado a partir de la posición, pero la evolución en el tiempo de la posición y del momento —y, por tanto, la trayectoria de los puntos materiales en el espacio medido por estas variables— son deducibles de la función hamiltoniana, que contiene así, bajo su forma canónica, la verdad dinámica del sistema. Cierto es que, en los casos simples (péndulo, resorte, obús de cañón) las variables canónicas son las variables usuales, pero esto no es más que una cuestión de oportunidad, no una obligación.

El Hamiltoniano $H(p, q)$ constituye entonces la magnitud fundamental de la que pueden ser deducidas la descripción del sistema y su evolución. Definir un problema dinámico en el marco del formalismo hamiltoniano es, de entrada, escoger la mejor representación canónica del sistema, escoger variables canónicas p, q, tales que el Hamiltoniano expresado en función de estas variables tenga la estructura más apropiada para la resolución del problema, para la integración de las ecuaciones. Existe un número infinito de representaciones de un sistema dinámico dado, de las que cada una puede constituir bastante más que una simple transformación geométrica de la representación «intuitiva» del sistema: las variables canónicas pueden ser funciones muy complejas de las posiciones y de las velocidades «intuitivas». Pero lo esencial es que todas las representaciones canónicas son equivalentes; cada uno de los puntos de vista canónicos sobre el sistema contiene la verdad completa sobre este sistema. En cuanto conocemos el Hamiltoniano expresado en función de las variables escogidas, podemos calcular, para cada uno de los puntos, la derivada de esta función con respecto a la variable de posición y a la variable de momento, $\partial H(p, q)/\partial q$ y $\partial H(p, q)/\partial p$[14]. Estas derivadas tienen un sentido físico. La primera da la variación a lo largo del tiempo de p, dp/dt, y la segunda, la variación a lo largo del tiempo de q, dp/dt. El Hamiltoniano constituye entonces la ley del movimiento del sistema estudiado; cualquiera que sea la representación escogida, la evolución en el tiempo de las variables canónicas correspondientes pueden deducirse del Hamiltoniano a través de las *mismas* ecuaciones canónicas.

Las ecuaciones canónicas constituyen, sin lugar a duda, una de las más destacables realizaciones de la historia de las ciencias. Su alcance no se ha limitado, de hecho, a la dinámica. Juegan un papel fun-

---

[14] El ∂ indica que se trata de derivadas *parciales*. H es simultáneamente función de p y q, pero se deriva únicamente con respecto a una de las dos variables.

damental y notable en mecánica «estadística», aplicable a sistemas constituidos por un gran número de partículas en interacción, en mecánica cuántica, aplicable a las moléculas y a los átomos. Es verdad que el significado de las ecuaciones de Hamilton se ve por ello generalizado, abstraído. En mecánica cuántica, tal como veremos, el Hamiltoniano función de las coordenadas y de los momentos se debe reemplazar por un ente de nuevo tipo, un *operador.* Sin embargo, las ecuaciones hamiltonianas subsisten; constituyen lo que podríamos llamar el lenguaje eterno de la dinámica y forman parte, de modo definitivo, de nuestra ciencia.

El Hamiltoniano es, ya lo hemos dicho, la suma de las energías cinéticas y potencial expresadas en función de las variables canónicas escogidas para describir el sistema.

En tanto que la definición del Hamiltoniano da su contenido físico particular a cada problema, la estructura de las ecuaciones canónicas contiene las propiedades *a priori* de toda evolución dinámica. Las ecuaciones canónicas son *reversibles:* la inversión del tiempo es matemáticamente equivalente a una inversión de las velocidades. Son *conservativas:* el Hamiltoniano, que expresa la energía del sistema con un par de variables canónicas escogidas, se conserva a lo largo de la evolución en el tiempo que determina; en cada instante de esa evolución, la variación de la energía potencial compensa exactamente la de la energía cinética. La energía del sistema genera una evolución que la mantiene invariante.

El lenguaje abstracto de la dinámica hamiltoniana, digámoslo así, devuelve la concepción dinámica del movimiento a su verdad. De hecho, trata la sucesión de estados que aparecen a lo largo del tiempo como una sucesión de puntos de vista, equivalentes los unos a los otros, sobre la verdad invariante del sistema que representa el hamiltoniano. Es de destacar, desde el punto de vista Hamiltoniano, que sea indiferente el considerar que la evolución dinámica describe, desde un punto de vista dado, la transformación de un sistema o que describe la modificación aportada a la descripción de un sistema invariante cuando el punto de vista y, consecuentemente, la definición de las variables canónicas, cambia de manera continua.

Hemos dicho que todas las representaciones de un mismo sistema son equivalentes; están engranadas entre sí por las transformaciones canónicas (transformaciones unitarias en mecánica cuántica) que conservan la forma hamiltoniana de las ecuaciones del movimiento. Nos plantearemos más tarde el problema del carácter suficiente de es-

tas transformaciones y veremos que la naturaleza no se agota en los puntos de vista que engendra (véase capítulo IX, 5). Preguntémonos ahora cómo escoger el par de las variables canónicas, es decir, el punto de vista sobre el sistema a seguir con el cual la evolución será descrita de una manera óptima.

En los ejemplos tipo de la dinámica clásica difícilmente se escapa a la selección de variables dinámicas de posición y de velocidad que expresan eficazmente la descripción más simple. En los problemas más complejos, la selección puede exigir más sutileza. Se trata de llegar al sistema de ecuaciones diferenciales más fácilmente integrable. Lo que cuenta es la estructura del Hamiltoniano, el cual, por derivación, da las variaciones de p y de q. Ahora bien, podemos imaginar una estructura particular que permitiría hacer la integración del todo fácil. Bastaría encontrar variables canónicas tales que el Hamiltoniano se encuentre reducido al término de energía cinética, que no depende más que de los momentos, es decir, tales que en términos de energía potencial, que no depende más que de las coordenadas de posición, se anule. En efecto, en ese caso los momentos cuya evolución viene dada por la derivada del Hamiltoniano respecto a las coordenadas de posición, no serían más que *invariantes* del movimiento $[\partial H(p)/\partial q = 0]$. En cuanto a las posiciones, la integración de su ecuación de evolución no ofrecería ninguna dificultad: tendremos una especie de movimiento pseudoinercial, en donde cada punto del sistema evoluciona independientemente de todos los demás (figura 1):

Ahora bien, esta representación singular que suprime formalmente toda interacción entre las unidades del sistema *define para noso-*

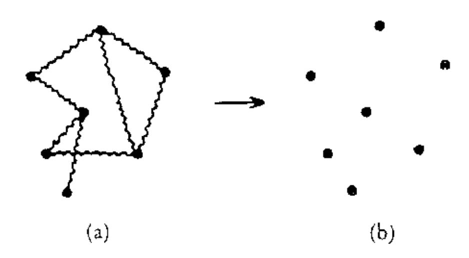


Figura 1. Transición de la representación de un sistema dinámico, como un conjunto de puntos interaccionantes, a la representación privilegiada, en donde cada punto se compòrta independientemente de los otros (eliminación formal de la energía potencial).

tros el concepto de integrabilidad. Todo sistema descrito en función de ecuaciones diferenciales integrables puede ser representado como un conjunto de unidades cada una de las cuales evoluciona aisladamente, con independencia de todas las demás, en ese movimiento eterno y siempre igual a sí mismo que Aristóteles habría atribuido a los cuerpos divinos solamente. Como lo había hecho notar Maxwell [15], recogiendo una palabra a su vez recogida por Hegel a los «antiguos» [16], no solamente son los planetas, sino todas las partículas las que, como los dioses felices, van a donde quieren, cada una desplegando por su propia cuenta la ley singular de su capricho.

La particularidad de tal definición es que hace aparecer desde el nivel de las ecuaciones diferenciales no solamente la energía, sino el conjunto de los diferentes invariantes del movimiento dinámico, es decir, de las magnitudes físicas que guardan un valor constante a la largo de toda la evolución y bastan para determinarla enteramente. El que todo sistema dinámico integrable pueda ser asimilado a este tipo de definición, pone de manifiesto con evidencia el carácter estático y determinista de toda descripción a través de trayectorias dinámicas: «todo viene dado» significa aquí que, desde el primer instante, el valor de los diferentes invariantes del movimiento viene dado, nada puede ya «suceder» u «ocurrir», ninguna interacción puede alterar el movimiento pseuso-inercial; no solamente el sistema, sino cada unidad constitutiva de ese sistema no para de repetir, bajo formas equivalentes, un estado inicial del cual no puede olvidar el mínimo detalle.

Durante mucho tiempo se ha pensado que los sistemas integrables debían ser tomados como modelos de sistema dinámico. La dinámica se proponía aplicar el mismo método a todo problema; encontraría el «buen» cambio de variables que eliminaría las interacciones y la evolución dinámica se encontraría explícitamente reducida a la repetición de sí misma. Un ejemplo particularmente estudiado fue el célebre problema de tres cuerpos, quizá el problema más impor-

[15] J. C. Maxwell, *Report on Tait's Lecture on Force*, en L. Campbell y W. Garnett, *The life of James Clerk Maxwell*, Londres, MacMillan, 1882, p. 648.

[16] En *De Orbitis Planetarium* (Jena, 1801), Hegel escribe: «Corpora autem coelestia glebae non adscripta et centrum gravitatis perfectius in se gerentia, Deorum more per levem aera incedant», recuperando la misma idea en el párrafo 269 de la *Filosofía de la Naturaleza;* hemos consultado la traducción inglesa de la *Filosofía de la Naturaleza*, traducida, introducida y anotada por M. J. Petry, 3 vols., Londres, Allen and Unwin, 1970 (vol. 1, pp. 261 y 347).

tante de la historia de la física. El movimiento de la Luna, influido al mismo tiempo por la Tiera y el Sol, anuncia ya este problema. Fueron numerosas las tentativas de ponerlo bajo su forma integrable hasta que, a finales del siglo XIX, Bruns y Poincaré demostraron que era imposible. Fue una sorpresa y esa sorpresa anunciaba el fin de las extrapolaciones desde la física de los movimientos simples, el fin de la convicción de que el movimiento dinámico es homogéneo.

Otras indicaciones en el mismo sentido hicieron su aparición en esta época. Así, ciertos investigadores notaron que una trayectoria puede volverse intrínsecamente indeterminada en ciertos puntos singulares. Un péndulo rígido puede tener dos tipos de comportamientos cualitativamente diferentes: bien puede oscilar o bien dar vueltas alrededor de su punto de suspensión. Si su empuje inicial es exactamente el suficiente para hacerle llevar con una velocidad nula a su posición vertical, la dirección hacia la cual volverá a caer y, así, la naturaleza de su movimiento es indeterminada: una perturbación infinitesimal basta para arrastrar el sistema bien hacia una rotación, bien hacia una oscilación. Es el problema de la inestabilidad del movimiento sobre la cual volveremos a hablar largamente (capítulo IX, 1).

Es interesante constatar que Maxwell ya había subrayado la importancia de tales puntos singulares: «En todos los casos de este género (Maxwell acaba de describir la explosión del algodón fulminante), existe una circunstancia común; el sistema posee una cantidad de energía potencial que puede ser transformada en movimiento, pero que no puede comenzar a serlo más que cuando el sistema haya alcanzado una cierta configuración, lo que necesita un gasto de trabajo que puede ser infinitesimal y es en general despreciable frente a la energía que permite liberar. Así la roca, desprendida por la helada, en equilibrio sobre un punto singular del flanco de la montaña, la pequeña chispa que enciende el inmenso bosque, la pequeña palabra que mueve al mundo a la guerra, el pequeño escrúpulo que impide al hombre hacer lo que quiere, la pequeña espora que estropea todas las patatas, el pequeño germen que hace de nosotros filósofos o idiotas. Pero la existencia a partir de un cierto nivel tiene sus puntos singulares: cuanto más elevado es el nivel más numerosos son los puntos. En estos puntos, ciertas influencias, cuya talla física es demasiado pequeña para ser tomada en consideración por un ser finito, pueden producir resultados de la mayor importancia. Todos los grandes resultados producidos por las empresas humanas dependen de la manera en la que nos aprovechamos de estos estados singulares cuando

se presentan»[17]. Esta concepción quedó sin respuesta a falta de técnicas matemáticas necesarias para identificar los sistemas que poseen tales puntos *singulares* y, a falta de los conocimientos en química y en biología que nos permiten hoy, lo mostraremos más tarde, comprender de manera más precisa el papel efectivamente esencial de estos puntos singulares.

De cualquier manera, desde las mónadas de Leibniz (véase conclusión, 4) hasta nuestros días, por ejemplo, los estados estacionarios del electrón en el modelo de Bohr (véase capítulo VIII), el sistema integrable ha permanecido, de hecho, el modelo por excelencia de sistema dinámico y los físicos han buscado extrapolar al conjunto de los procesos naturales las propiedades de lo que no constituye, de hecho, más que una clase de Hamiltonianos muy particulares. Lo que por otra parte es muy comprensible: cuando pensamos en «sistema dinámico», es evidentemente en esta clase de sistemas dinámicos en la que pensamos, ya que son los que han podido ser explorados de la manera más completa hasta estos últimos años. También debemos contar con la fascinación que suscita siempre un sistema cerrado, capaz de plantear todos los problemas desde el momento en que no los define como desprovistos de sentido. La dinámica es un tal lenguaje, sin exterior, coextensivo por definición al mundo que describe. Para ella, todos los problemas, simples o complejos, se parecen, ya que puede siempre plantearlos bajo la *misma* forma general. De ahí la tentación de extraer la conclusión de que, idealmente, desde el punto de vista de su solución, todos los problemas se parecen y de que nada nuevo puede aparecer debido a la mayor o menor complejidad del procedimiento de interacción. Sabemos ahora que esta homogeneidad postulada es falsa. Volveremos a tratar este problema más adelante. Pero nosotros, que sabemos hoy qué diferencias cualitativas aparecen entre los sistemas dinámicos, podemos mejor medir las consecuencias culturales y epistemológicas de la fascinación ejercida por el modelo de sistema integrable. Desde Leibniz hasta nosotros, encontramos esta convicción. El universo, si es un sistema dinámico, debe ser concebido con las propiedades de un sistema dinámico integrable.

---

[17] J. C. Maxwell, *Science and Free will*, en L. Campbell y W. Garnett, *op. cit.*, p. 443.

4. *La dinámica y el diablillo de Laplace*

La descripción dinámica, concebida según el modelo de sistema integrable, posee un símbolo: el diablillo imaginado por Laplace, capaz de observar en un instante dado la posición y velocidad de cada una de las masas constitutivas del universo y de deducir a partir de ahí la evolución universal, tanto hacia el pasado como hacia el futuro.

Claro está que nadie ha pensado jamás el que un físico podría un día beneficiarse del saber del diabillo de Laplace. El mismo Laplace había recurrido a esta ficción para poner de manifiesto la extensión de nuestra ignorancia práctica y la necesidad de una descripción estadística de ciertos procesos. El problema del diabillo de Laplace no es sólo el de la posibilidad efectiva de una previsión determinista del curso de las cosas, es más bien el problema de su posibilidad de principio, y esta posibilidad de principio de una preciencia total está implicada por la dualidad de la ley dinámica y de la descripción de las condiciones iniciales.

En efecto, el hecho de que podamos describir un sistema dinámico como sometido a una *ley* determinista, incluso si la ignorancia práctica del estado inicial excluye toda *previsión* determinista, permite distinguir entre la «verdad objetiva» del sistema, tal como lo contempla el diablillo de Laplace, y el hecho de nuestra ignorancia. En estas condiciones, la idea de que la definición instantánea de un sistema no basta para determinar su evolución, de que el determinismo físico tiene elementos que no son los límites de nuestras capacidades de observación y de cálculo, parecía que debía ser afirmada no solamente en contra del diablillo de Laplace, sino en contra de la dinámica. En el marco de la dinámica clásica, la descripción determinista puede ser inaccesible en la práctica, no por ello deja de perfilarse como un *límite* que define la serie de las descripciones de precisión creciente.

Es precisamente la dualidad leyes-condiciones iniciales la que, como veremos, se encuentra hoy en tela de juicio: la idea de que el concepto de estado inicial de un sistema es siempre válido, cualquiera que sea la ley dinámica de este sistema, la idea de que la determinación de las condiciones iniciales es una operación teóricamente concebible para todo sistema dinámico, está hoy abandonada. Pero volveremos más tarde (capítulo IX) sobre esta brecha al fin descubierta en el edificio de la dinámica clásica y sobre la muerte al fin sobrevenida del diablillo de Laplace. La ciencia clásica, en lo que a ella ata-

ñe, desde el momento en que aceptaba la verdad de la descripción dinámica, *debía* concluir en el determinismo universal, en el carácter ilusorio de los procesos que constituyen el mundo que habitamos y que nos han producido a los seres vivos y parlantes.

La ciencia moderna ha nacido de la ruptura de una alianza animista con la naturaleza: en el seno del mundo aristotélico, el hombre parecía encontrar su sitio, a la vez como ser viviente y como ser conocedor, el mundo estaba hecho a su medida, el conocimiento intelectual alcanzaba el principio mismo de las cosas, la causa y la razón final de su devenir, la finalidad que los habita y los organiza. El primer diálogo experimental recibió, en lo que a él concierne, parte de su justificación social y filosófica de otra alianza, esta vez con el Dios creador y racional de los cristianos. En la medida en que la dinámica se ha convertido y ha permanecido como ciencia modelo, ciertas implicaciones de esta «alianza», rápidamente rota, sin embargo, han subsistido y, en primer lugar, el desconocimiento de la alianza experimental, la cual, de hecho, se había ligado con la naturaleza.

La ciencia, convertida en laica, ha permanecido como el anuncio profético de un mundo descrito tal como se ve contemplado desde un punto de vista divino o demoníaco: la ciencia de Newton, este nuevo Moisés ante quien se descubrió la verdad del mundo, es una ciencia *revelada*, definitiva, extraña al contexto social e histórico que la identifica como actividad de un comunidad humana. Este tipo de discurso profético, inspirado, lo volvemos a encontrar a lo largo de la historia de la física, acompañó a cada una de las innovaciones conceptuales, cada vez que la física parecía unificarse y cada vez que este triunfo llevaba a los físicos a abandonar la máscara prudente del positivismo. Cada vez han repetido, en el lenguaje de la época, lo que escribía el hijo de Ampère: esta palabra —atracción, energía, teoría de campos, partículas subatómicas— es la palabra de la creación. Cada vez que los físicos anuncian, como en la época de Laplace o finales del siglo XIX, que la física es un tema cerrado —o próximo a serlo, ya que se puede designar el último punto en el cual la naturaleza resiste todavía, aquel punto de resistencia que, una vez vencido, la librará completamente y sin defensa al conocimiento— repiten sin saberlo los gestos de la antigua fe, esperan un nuevo Moisés, la repetición del triunfo newtoniano.

Qué importa, se dirá, esta pretensión profética injustificable, qué importa este entusiasmo ingenuo. ¿No se ha proseguido el diálogo con la naturaleza, la investigación de nuevos lenguajes teóricos, de

nuevas preguntas, de nuevas posibilidades de respuesta? Ciertamente, pero la interpretación global no deja de tener influencia sobre las investigaciones locales. La interpretación global se apoya sobre el trabajo efectivo de los científicos, pero también inversamente, lo orienta, es ella la que privilegia ciertas direcciones de investigación, fija las relaciones entre las diferentes regiones del saber y el frente avanzado de la interrogación. Es ella la que define la estrategia y, sobre todo, la define como estrategia: cercar a la naturaleza, obligarla a confesar la ley a la cual está sometida, el lenguaje que habla [18].

Cualquiera que sea el lenguaje que hasta ahora la física ha prestado a la naturaleza, este lenguaje ha definido siempre un mundo natural del cual el hombre está excluido, lo que, por supuesto, se explica fácilmente. El diálogo experimental, en sus principios, no podía más que plantear problemas elementales; los objetos de referencia cuya descripción la física ha conseguido matematizar y que guían su exploración, tales como el movimiento de los astros y el funcionamiento de las máquinas simples idealizadas, son de una simplicidad muy particular y son ellos los que están en la base del mundo newtoniano anunciado por Laplace. El hombre, sea lo que sea, es el producto de procesos físico-químicos extremadamente complejos y también, indisociablemente, el producto de una historia, la de su propio desarrollo, pero también el de su especie, de sus sociedades entre las otras sociedades, naturales, animales y vegetales. Complejidad e historia, estas dos dimensiones están realmente ausentes del mundo que contempla el diablillo de Laplace. La naturaleza que supone la dinámica clásica es una naturaleza a la vez amnésica, desprovista de historia y enteramente determinada por su pasado, es una naturaleza indiferente, para la cual todo estado es equivalente, y una naturaleza sin relieve, llana y homogénea, la pesadilla de una insignificancia universal. El tiempo de esta física es el tiempo del despligue progresivo de una ley eterna, dada de una vez por todas y totalmente expresada por cualquier estado del mundo.

La forma sistemática que se ha dado la física clásica, su pretensión de constituir una descripción del mundo cerrada, coherente, completa, expulsa al hombre del mundo que describe en tanto que

[18] Este problema constituye uno de los temas de la obra de Michel Serres; véase, en particular, el capítulo «Conditions» de la *Naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, París, Minuit, 1977.

habitante, pero también, como lo hemos mencionado, en tanto que lo describe.

Es Einstein, una vez más, el que destaca el enigma sobre el que desemboca el mito de la ciencia moderna; lo ha escrito y repetido: el milagro, la única cosa verdaderamente asombrosa, es que hay una ciencia, que hay una convergencia entre la naturaleza y el espíritu humano tal que una estructura matemática libremente inventada pueda alcanzar la estructura misma del mundo. Resuena en este estupor algo parecido al eco de otra declaración, célebre en su tiempo. Cuando, al final del siglo XIX, el físico alemán Du Bois-Reymond hizo del diablillo de Laplace la encarnación de la lógica de la ciencia moderna, añadió: «*Ignorabimus*», ignoraremos siempre y totalmente la relación entre este mundo, que nuestra ciencia hace transparente, y el espíritu que conoce, percibe, crea esta ciencia [19].

El mundo de Laplace, tal como aquel al que aspiraba Einstein, es un mundo simple e insípido, sin sombra, sin espesor, que se entrega como totalmente independiente de la actividad experimental, de la elección de puntos de vista, de la selección de las propiedades pertinentes; el hombre, en tanto que habitante participante en un devenir natural, es inconcebible en él; en tanto que experimentador activo, que elige, manipula, pone en escena, comunica, discute y critica sus resultados, ha desaparecido igualmente, se ha contraído hasta no ser más que un punto: la conciencia cognoscitiva que contempla un mundo entregado y sin misterio. Pero este punto no es sino un residuo de una opacidad total. Está en la oscuridad impenetrable que constituye la correlación lógica a un mundo totalmente iluminado por falta de relieve, un punto fuera del mundo, una fuente inconocible de luz.

La naturaleza tiene mil voces y solamente hemos empezado a escucharla; sin embargo, desde hace aproximadamente dos siglos, el diablillo de Laplace obsesiona nuestra imaginación, resurge sin cesar y, con él, la pesadilla de la insignificancia de todas las cosas, la soledad alucinada del que, durante tanto tiempo, se había creído al alcance de un mundo a su medida. Si realmente el mundo es tal que un diablillo —es decir, a pesar de todo, un ser similar a nosotros, poseyendo la misma ciencia pero con sentidos más agudizados y una potencia mayor de cálculo— pudiera calcular el porvenir y el pasado a partir de la observación de un estado instantáneo, si realmente la ver-

[19] Véase a propósito del diablillo de Laplace, E. Cassirer, *Determinism and Indeterminism in Modern Physics*, New Haven, Yale University Press, 1956, pp. 3-25.

dad de la naturaleza está contenida en la dinámica y si nada distingue cualitativamente los sistemas simples, que podemos describir, de aquéllos, más complejos, para los cuales haría falta un diablillo, entonces el mundo no es más que una inmensa tautología, eterna y arbitraria, tan necesaria y absurda en cada uno de sus detalles como en su totalidad. Tal es el desafío de esta ciencia moderna que nos ha legado el siglo XIX y que nos es necesario exorcizar hoy.

Capítulo III
LAS DOS CULTURAS

1. *El discurso de lo viviente*

Hemos visto dos modelos, el de Aristóteles y, más tarde, el de Galileo, dominar sucesivamente el pensamiento occidental. ¿Cuál escoger? ¿Es necesario para comprender los procesos naturales observar el movimiento de los astros, de los seres vivos que pueblan la tierra? Ya hemos dicho que el desarrollo de la ciencia moderna se ha visto marcado por el abandono de la aspiración vitalista, en particular de las causas finales aristotélicas. Sin embargo, el problema de la organización viviente subsiste y Diderot, por ejemplo, subraya, en la misma época del triunfo newtoniano, que dicho problema se ha visto de hecho relegado por la física: se lo imagina obsesionando el sueño de los físicos, incapaces de pensar en él despiertos, es decir, en el marco de sus teorías. D'Alembert sueña: «Un punto viviente... No me equivoco. Primero nada y luego un punto viviente...; a este punto viviente se le añade otro y otro más; y después de estas añadiduras sucesivas, resulta un solo ser, ya que soy uno solo, de lo que no dudo. [Diciendo esto, se tocaba por todas partes.] Pero cómo se ha realizado esta unidad... ¡Mira, filósofo, veo un agregado, un tejido de peque-

ños seres sensibles, pero un animal... un todo... que tiene la conciencia de su unidad! No lo veo, no, no lo veo... [1].»

En esta entrevista imaginaria con d'Alembert, Diderot se pone él mismo en escena, haciendo estallar la insuficiencia de la explicación mecanicista: «¿Ve usted este huevo? Pues con esto es con lo que se derriban todas las escuelas de teología y todos los templos de la tierra. ¿Qué es este todo? Una masa insensible antes que el germen se haya introducido... ¿Cómo pasará esta masa a otra organización, a la sensibilidad, a la vida? Por el calor. ¿Quién producirá el calor? ¿El movimiento? ¿Cuáles serán los efectos sucesivos de este movimiento? En lugar de responderme, siéntese y sigámoslo con la vista en todo momento. Primero, es un punto que oscila, una red que se extiende y se colorea; carne que se forma, un pico, pequeñas alas, ojos, unas patas que aparecen; una materia amarillenta que se apelotona y produce intestinos; es un animal... anda, vuela, se irrita, huye, se aproxima, se queja, sufre, ama, desea, goza; tiene todas vuestras afecciones; todas vuestras acciones, las hace. ¿Pretenderá usted, como Descartes, que no es más que una pura máquina imitativa? Pero los niños pequeños se burlarán de usted y los filósofos le replicarán que si allí tiene una máquina, usted es otra. Si usted confiesa que entre el animal y usted no hay diferencias más que de organización, mostrará sentido y razón, estará usted de buena fe; mas concluirán en contra de usted que con una materia inerte dispuesta de una cierta manera, impregnada de otra materia inerte, del calor y del movimiento, se obtiene sensibilidad, vida, memoria, conciencia, pasiones, pensamiento...; escuche y tendrá usted piedad de sí mismo, sentirá que, por no admitir una suposición simple que lo explica todo, y la sensibilidad, propiedad general de la materia, el producto de la organización, renuncia usted al sentido común y se precipita en un abismo de misterios, de contradicciones y de absurdos [2].»

En contra del templo de la mecánica racional, contra todos aquellos que anuncian que la naturaleza material no es más que masa inerte en movimiento, Diderot acude así a lo que fue sin duda una de las más antiguas fuentes de inspiración de la física, el espectáculo del desarrollo progresivo, de la diferenciación y de la organización aparentemente espontánea del embrión. Se forman la carne, el pico, los ojos,

[1] D. Diderot, *Le Rêve de d'Alembert*, en *Œuvres*, París, Gallimard, La Pléiade, 1935, p. 677.

[2] D. Diderot, *Entretien entre d'Alembert et Diderot*, *op. cit.*, pp. 670-671.

los intestinos; sí, sí, que hay una organización progresiva de un espacio propiamente biológico, aparición, a partir de un medio homogéneo, de una masa al parecer insensible, de formas diferenciadas, precisamente en el momento y en el lugar oportunos, en un proceso coordinado y armonioso.

¿Cómo admitir que la masa inerte, e incluso la masa newtoniana animada por las fuerzas de interacción gravitacional, pueda fundamentar la explicación de esta aparición de estructuras locales organizadas y activas? Bien es verdad que las leyes newtonianas del movimiento describen las trayectorias circulares y elípticas, que constituyen las formas localizadas en una región limitada del espacio, pero también describen la parábola y la hipérbola que escapan al infinito. El círculo y la hipérbola están determinados por la *misma* fuerza, sólo varían las condiciones iniciales de la trayectoria, posición y velocidad. El sistema newtoniano constituye un *sistema del mundo*. La totalidad de los cuerpos del Universo está en interacción y nada privilegia los movimientos restringidos a un subespacio con respecto a trayectorias sin límites espaciales. El sistema newtoniano no da sentido alguno a la diferenciación del espacio, a la constitución de límites naturales, a la aparición de un funcionamiento organizado; en resumidas cuentas, a ninguno de los procesos que implica el desarrollo de un ser vivo.

Pero Diderot no desespera. La ciencia acaba de empezar, escribe, la mecánica racional no era más que una primera tentativa, demasiado abstracta, y el espectáculo del huevo bastará para derribar sus pretensiones. Los niños ya ríen y los filósofos ya replican. Por eso compara los trabajos de los grandes mecánicos, los Euler, Bernouilli, d'Alembert, a las pirámides egipcias, testimonio grandioso y horrorizante del genio de sus constructores pero que, en adelante, no hacen más que subsistir, solitarias y abandonadas. La verdadera Ciencia, viva y fecunda, se proseguirá en otro lugar [3].

De todas maneras, le parece que esta nueva ciencia, ciencia de la naturaleza viva y organizada, existe ya. D'Holbach estudia la química, Diderot la medicina. En los dos casos se trata de oponer a la masa inerte y a las leyes universales de la mecánica la masa activa, capaz de organizarse, de producir seres vivos. Diderot sostiene que la materia es sensible, incluso lo es la piedra, que tiene sordas sensaciones

[3] D. Diderot, *Pensées sur l'Interprétation de la Nature*, 1754, en *Œuvres Complètes*, tome II, París, Garnier Frères, 1875, p. 11.

en el sentido de que las moléculas que la componen buscan activamente unas combinaciones, evitan otras, se ven regidas por sus deseos y aversiones. La sensibilidad del organismo entero no es más que la suma de la de sus partes, como el enjambre de abejas, de comportamiento globalmente coherente, viene creado por la interacción local, de cercana a cercana, entre las abejas; no hay más alma humana que alma de la colmena [4].

La protesta vitalista de Diderot contra la física y las leyes universales del movimiento tiene por origen el rechazo de todo dualismo espiritualista. Es necesario que la naturaleza material sea descrita de manera tal que se pueda explicar sin absurdo la existencia fundamentalmente natural del hombre. A falta de ello, y eso es lo que llega con la mecánica racional, la descripción científica de una naturaleza autómata estará en correlación con el autómata *provisto de alma*, extraño en esto a la naturaleza.

La doble inspiración, química y médica, del naturalismo materialista que Diderot opone a la física de su época es muy común al siglo XVIII. Cuando los biólogos especulan sobre el animal máquina, la preexistencia de gérmenes y la gran cadena de los seres vivos, con todas las problemáticas embestidas de parte a parte por la teología [5], son a menudo los químicos y los médicos, en la mayoría de los casos químicos-médicos, los que se ven directamente enfrentados a la complejidad de los procesos reales, a su diversidad, a la singularidad de los comportamientos de la materia y de la vida.

Igualmente, desde un punto de vista metodológico, la química, al igual que la medicina son, a finales del siglo XVIII, ciencias privilegiadas para aquellos que luchan contra el «espíritu de sistema» de los físicos por una ciencia respetuosa de la diversidad de los procesos naturales: un físico podría ser un espíritu puro; podría ser un niño sin experiencia, pero genial; un médico, un químico deben, en lo que a ellos respecta, poseer la experiencia y la instrucción, deben descifrar los signos, reconocer los indicios. En este sentido, la química y la medicina son *artes*, implican el «ojo clínico», la asiduidad, la observa-

---

[4] Diderot pone esta declaración en boca del médico Bordeu en *Le Rêve de d'Alembert*. Véase J. Roger, *Les Sciences de la vie dans la pensée française de XVIII^{e} siècle*, para un análisis de las relaciones entre Diderot y los filósofos-médicos de su época y, p. 623, el texto de Bordeu sobre la colmena.

[5] Véase el estudio de Roger y el célebre *Great Chain of Being* de A. Lovejoy (Harvard, University Press, 1973).

ción encarnizada [6]. La química es una pasión de locos, concluye Venel en el artículo que escribe para la *Enciclopedia* de Diderot, elocuente defensa de la química contra el imperialismo abstracto de los newtonianos [7].

La protesta de los químicos y de los médicos, la protesta de los prácticos enfrentados a la enfermedad, a la infección, a la corrupción, contra la generalización física, contra los tranquilos mecanismos y la tranquilidad de las leyes universales a las cuales los físicos pretendían reducir el cuerpo vivo, era ya antigua en la época de Diderot. La eminente figura de Stahl, padre del vitalismo y creador del primer sistema químico coherente y fecundo, debe evocarse aquí.

Las leyes universales se aplican a lo viviente, afirma Stahl, solamente en el sentido de que son ellas las que lo consagran a la muerte, a la podredumbre; las materias de las que lo viviente está constituido son tan frágiles, se descomponen tan fácilmente, que si estuviera regido por las solas leyes comunes de la materia, no resistiría un solo instante a la corrupción y a la disolución. Si lo vivo pervive, a pesar de ello —tan corta como pueda ser la duración de su vida con respecto a la de una piedra o a la de otro cuerpo inanimado—, es necesario que haya en él un «principio de conservación» que constituye

[6] Esta protesta de Venel constituye, entre otros, un símbolo de la resistencia del trabajo «artístico» (tal como lo caracteriza Moscovici en su *Essai sur l'histoire humaine de la nature:* «Los hombres son su mejor memoria, sus gestos su mejor lenguaje», p. 85), contra el trabajo «instrumental», con su nueva economía de las facultades biológicas, de las cuales algunas se agudizan, otras degeneran: «La percepción se duplica de estimaciones y cálculos: el ojo ve geométricamente. El funcionamiento de los mecanismos del reloj de giro universal crea nuevos sentidos... La sensibilidad se desgaja de la experiencia inmediata y cesa de ser olfato, mirada, toque» (S. Moscovici, p. 94).

[7] El historiador de las ciencias Gillipsie ha adelantado la tesis según la cual existiría una fuerte relación entre la protesta en contra de la física matemática, que Diderot popularizó y de la cual *La Enciclopedia* se hizo eco, y la hostilidad de los revolucionarios que cerraron la Academia y decapitaron a Lavoisier. Esta cuestión es fuertemente controvertida, pero queda que el triunfo newtoniano en Francia coincide con un período de ordenación, y la victoria de la Academia sobre los artesanos empíricos defendidos por Diderot («The Encyclopedia and the Jacobin Philosophy of Science. A Study in Ideas and Consequences», en *Critical Problems in the History of Science*, ed. M. Clagett, Madison, Wisconsin, 1959, pp. 255-289). Podemos poner énfasis en este otro punto: la autonomía de la química, que defendían los químicos-filósofos y los artesanos, se ha visto al fin realizada, pero en el marco de la compartimentación académica y de la definición de una práctica positivista de la química. El abandono del programa de la química newtoniana no ha coincidido con el reconocimiento de lo bien-fundado de la «química filosófica», sino que se ha hecho *contra* ella.

y mantiene el equilibrio social armónico de la textura y de la estructura de su cuerpo. La asombrosa duración de la vida del cuerpo viviente, dada la extrema corruptividad de la materia que lo compone, manifiesta la acción de un «principio natural, permanente, inmanente», de una causa particular extraña a las leyes de la materia inanimada, y que lucha sin cesar contra la corrupción siempre actuante, la cual, a su vez, resulta de esas leyes [8].

Este análisis del problema de la vida nos es a la vez próximo y lejano; próximo por su conciencia aguda de la precariedad de la vida y de su singularidad con respecto a las leyes generales de la disolución y de la dispersión, y lejano ya que, como Aristóteles, Stahl definió ante todo lo viviente en términos estáticos, en términos de conservación y no de devenir. De hecho, podemos reconocer este mismo privilegio otorgado a la permanencia en lo que concierne al problema de lo viviente, en la preeminencia que, en nuestros días, ciertos biológos dan a la información genética. Encontraremos así, de manera muy normal, el tipo de vocabulario empleado por Stahl en los textos de estos biólogos: los enzimas «luchan» contra la degradación, permiten al cuerpo retardar una muerte a la cual la física lo empuja inexorablemente; la organización constituye un desafío a las leyes de la naturaleza y la sola evolución «normal» es la que lleva a la muerte (véase capítulo VI, 4).

El vitalismo de Stahl ha conservado su pertinencia mientras que las leyes de la física se han identificado con las tendencias a la disolución y a la desorganización: el «principio vitalista» ha sido reemplazado por la sucesión improbable de las mutaciones, que conserva el texto genético, pero no por ello ha dejado de estar lo vivo al margen de la naturaleza. Ha sido necesario el descubrimiento de los «nuevos estados de la materia» que constituyen las estructuras disipativas para que al fin la conservación y el desarrollo de las estructuras activas puedan ser deducidas de las leyes de la física, para que la organización aparezca como un proceso *natural* (capítulos V y VI).

Sin embargo, mucho antes de esta respuesta teórica a la pregunta de Stahl, el discurso de lo vivo se había transformado, ya que otra protesta contra el mecanicismo, el pensamiento romántico, había trastornado el paisaje intelectual en donde ese discurso se arraigaba.

---

[8] G. E. Stahl, «Véritable distinction à établir entre le mixte el le vivant du corps humain», en *Œuvres médico-philosophiques et pratiques*, tome II, Pitrat et Fils, Montpellier, 1861, especialmente pp. 279-282.

Stahl criticaba la metáfora del autómata porque, al contrario de lo vivo, el autómata tiene su fin fuera de sí mismo, su organización le es impuesta por el constructor. Lo propio de lo vivo es, según Stahl, ser intrínsecamente mecánico, poseer en sí la razón y la finalidad de su organización. Diderot, lejos de situar el estudio de lo vivo fuera del alcance de la cienca, veía en ese estudio el porvenir de las ciencias racionales y experimentales, cuyo desarrollo, según él, no hacía más que empezar. Algunos años más tarde se ponen en duda estos dos puntos de vista [9]. «Autómata» llega a ser, sobre todo en Alemania, un término peyorativo: la actividad mecánica ya no plantea el problema de la naturaleza interna o externa de la finalidad organizadora, se ha vuelto sinónimo de artificio y muerte; a ella se oponen las nociones de vida, espontaneidad, libertad, espíritu, en un complejo que nos es familiar. Esta oposición se ve aumentada por la oposición entre el entendimiento calculador y manipulador y la libre actividad especulativa del espíritu, capaz de alcanzar inmediatamente, sin el esfuerzo laborioso de la ciencia objetiva, la actividad espiritual que constituye la naturaleza.

En resumen, se puede decir que el conocimiento filosófico de la naturaleza debía de estar más cerca —según esta nueva definición de los campos del pensamiento— del genio artístico, de la actividad del creador que entra en resonancia directa con la de la naturaleza creadora y productora de las formas, que del trabajo científico. El hombre de ciencia no sería capaz de dirigirse a la naturaleza si no es como a un conjunto de objetos particulares manipulables y mensurables: tomaría así posesión de una naturaleza que somete y controla, pero que no conoce. El verdadero conocimiento se encuentra así, por esencia, fuera del alcance de la ciencia.

Aquí no se trata de historia de la filosofía, sino simplemente de subrayar hasta qué punto la crítica filosófica de la ciencia se ha endurecido: lo que se combate no son ya pretensiones un poco ingenuas y ciegas que bastaría con repetir en voz alta para que los niños se riesen, poniendo en ridículo a quien las sostiene, sino el tipo mismo de conocimiento que produce el saber experimental y matemático de la naturaleza. El combate se lleva a cabo con argumentos que recuerdan los que hemos esbozado en el primer capítulo de este li-

---

[9] Véase J. Schlanger, *Les Métaphores de l'organisme,* para una descripción de la transformación en el sentido del término «organización» entre Stahl y los románticos, pp. 49-60.

bro. A este saber no se le reprochan sus límites, sino su fuerza misma, y es otro conocimiento, *rival*, fundado sobre otra gestión, el que se anuncia. La cultura se encuentra así polarizada alrededor de dos puntos de vista enfrentados, sin remedio alguno.

La transición entre Diderot y los románticos y, más precisamente, entre los dos modelos de informe crítico de la ciencia que acabamos de esbozar, puede aclararse, desde el punto de vista filosófico, por la transformación en la forma de plantear el problema de la ciencia que impuso Kant. Desde el punto de vista que nos interesa, lo esencial es que la crítica kantiana ha identificado al objeto científico en general con el objeto newtoniano; ha definido así como imposible una oposición al mecanicismo que no sea oposición a la ciencia misma y, por consiguiente, que sea una devaluación del trabajo de entendimiento en provecho de un tipo de conocimiento radicalmente diferente.

2. *La ratificación crítica*

Una de las principales ambiciones de la filosofía kantiana es la ordenación del paisaje intelectual que la desaparición de Dios, creador racional garante de las ciencias de la naturaleza, había dejado en pleno caos. Kant arregla, de una forma que para muchos sigue siendo válida, el problema de la verdad científica, esta verdad global a la cual los científicos pretenden tener acceso aun cuando nadie puede ya, sino es metafóricamente, sostener que la ciencia descifra la palabra de la creación. En adelante Dios se calla o, en todo caso, ya no habla el lenguaje del entendimiento humano [10].

Pero el caos no era solamente de orden epistemológico: en el seno de una naturaleza de donde el tiempo se ve eliminado, ¿qué deviene la experiencia subjetiva y el devenir que ésta supone, qué deviene la libertad, el destino singular de cada individuo?

La solución de Kant era en cierta manera la única posible para quien quería afirmar la posibilidad de una moral y, al mismo tiempo,

[10] Esta sección puede considerarse como una aplicación de la tesis de Michel Serres («Leibniz retraducido en lenguaje matemático», en *La Traduction*, París, Minuit, 1974), en donde se ve cómo toda filosofía que se coloca en la postura de juzgar a la ciencia se pone en postura de dominarla.

aceptaba el carácter entero y verídico de la descripción producida por la dinámica. En vez de centrar esta descripción en Dios, fuente del orden del mundo y responsable del conocimiento de este orden, había que centrarla en el ser humano, hacer de él creador a la vez que responsable del orden de los fenómenos naturales. El mundo de los fenómenos podría así verse doblado de otra realidad, que no fuera creada por el sujeto, una realidad espiritual que alimenta la vida estética, moral y religiosa del hombre.

La solución kantiana justifica a la vez el conocimiento científico y la extrañeza del hombre en el mundo descrito por esta ciencia: de hecho, lo que Kant elaboró así filosóficamente no es sino el discurso mítico de la ciencia moderna. En ese sentido, tomaba nota de la forma sistemática que la física se había dado a lo largo del siglo XVIII y asignaba a esta última su dominio de validez, determinaba los fundamentos y los límites de su legitimidad.

Kant definió la cuestión de la filosofía crítica como *trascendental:* no concierne a los objetos de la experiencia, sino que arranca del hecho *a priori* de que un conocimiento sistemático de estos objetos es posible —la existencia de la física lo demuestra— y denuncia las condiciones de posibilidad *a priori* de este modo de conocimiento.

Para ello hace falta distinguir las sensaciones simples que recibimos y el modo de conocimiento objetivo, el modo de conocimiento del entendimiento; el conocimiento objetivo no es pasivo, constituye sus objetos. Cuando tomamos un fenómeno como objeto de experimento, le atribuimos, *a priori,* antes de toda experiencia efectiva, un comportamiento legal, la obediencia a un conjunto de principios. En efecto, sostiene Kant, podemos hacer este tipo de suposición, el objeto que percibimos responde a nuestra expectativa, porque está ya sometido a este orden legal, porque es, en tanto que percibido como objeto de conocimiento posible, el producto de la actividad sintética *a priori* de nuestro espíritu. Nos precedemos a nosotros mismos en los objetos de nuestro conocimiento y el científico es la fuente de las leyes universales que descifra en la naturaleza.

Las condiciones de posibilidad de experimentación de un objeto son también las condiciones de posibilidad de su existencia; esta famosa frase resume la «revolución copernicana» realizada por la interrogación trascendental: el sujeto ya no «gira» alrededor de su objeto, tratando de descubrir a qué ley obedece, qué tipo de lenguaje puede permitir descifrarlo; está en el centro, impone la ley y el mundo, tal como lo percibe, habla su propio lenguaje. ¡Qué hay, pues, de

asombroso en que la ciencia newtoniana pueda describir el mundo desde un punto de vista exterior, casi divino!

Naturalmente, el hecho de que todo fenómeno del cual el entendimiento se apodera como objeto de interrogación se encuentre por eso mismo sometido *a priori* a los conceptos que el entendimiento irá descubriendo no significa que el conocimiento concreto de esos objetos sea inútil. La ciencia, según Kant, no dialoga con la naturaleza, sino que le impone su lenguaje; debe, sin embargo, descubrir, en cada caso, lo que las cosas dicen de particular dentro de ese lenguaje general. El conocimiento de los conceptos *a priori* es en sí mismo un conocimiento vacío, sin contenido; la labor de la ciencia es necesaria para someter efectivamente el conjunto del mundo a las categorías del conocimiento.

El diablillo de Laplace, ese símbolo del mito científico es, en el cuadro de esta doctrina, una ilusión, pero es una ilusión *racional.* Constituye ciertamente el resultado de un paso al límite poco legítimo, pero es también la expresión del convencimiento legítimo que guía a la ciencia, constituyendo su motor: la naturaleza en su totalidad se ve por derecho sujeta a la legalidad que poco a poco los científicos descifran de hecho. Donde quiera que vaya, sea cual fuere lo que interroga, la ciencia no obtendrá la misma respuesta, sino la misma forma de respuesta. Una sintaxis universal articula todas las respuestas posibles. Esta es la justificación filosófica de la semejanza entre la constitución de una estructura formal cerrada, como el lenguaje de la dinámica, y el proyecto de la descripción completa de un mundo homogéneo.

La filosofía transcendental ha otorgado así a la ciencia newtoniana el establecer la verdad de la actividad humana de exploración de la naturaleza, su codificación ha ratificado la pretensión de los físicos de haber puesto al día la forma final y definitiva de todo conocimiento positivo del mundo. Sin embargo, se ha asegurado simultáneamente una postura de dominio sobre la ciencia, ya no tiene que buscar el significado filosófico de los resultados de la actividad científica: desde el punto de vista transcendental, esos resultados no pueden, en efecto, aportar nada nuevo. La ciencia, y no sus resultados, es objeto de reflexión para la filosofía. La ciencia, fijada en sistema, definida como incapaz de producir un concepto pertinente para la filosofía, se ha vuelto el asiento estable de la reflexión transcendental.

En la medida misma en la cual ratificaba todas las pretensiones de la ciencia, la filosofía crítica de Kant circunscribía de hecho la acti-

vidad científica al campo de los problemas, hay que decirlo, fútiles y fáciles, la dedicada a la labor indefinida de descifrar el lenguaje monótono de los fenómenos, y se reserva el campo de las preguntas que conciernen al «destino» humano, lo que el hombre puede conocer, lo que debe hacer, lo que puede esperar. El mundo que estudia la ciencia, el mundo accesible al conocimiento positivo, «no es más» que el mundo de los fenómenos. No solamente el científico no puede conocer las cosas en sí, sino que las preguntas que puede hacerse no tienen pertinencia alguna para los verdaderos problemas de la humanidad; ni la belleza, ni la libertad, ni la ética son objetos de conocimiento positivo, o sea de ciencia: pertenecen al mundo numenal, dominio de la filosofía, totalmente extraño al mundo de los fenómenos.

El punto de partida de Kant, la tesis del papel activo representado por el hombre en la descripción científica, lo aceptamos sin ninguna reserva; hemos hablado demasiado de la experimentación como arte de elección y de escenificación para que sea útil volver otra vez sobre la idea de que en toda descripción científica, como en toda experimentación, se presuponen algunos principios para hacer posible la experimentación y que ésta no puede establecer. Sin embargo Kant, lo hemos visto, va mucho más lejos. Niega la diversidad de puntos de vista científicos sobre la naturaleza y, así pues, la necesidad de una elección irreducible y positiva: la selección de una situación problemática en el interior de la cual se pueden plantear preguntas precisas, contestaciones experimentales buscadas. De acuerdo con el mito de la ciencia moderna, Kant busca el lenguaje *único* que la ciencia descifra en la naturaleza, el conjunto único de cosas supuestas que condicionan la física y se identifican a partir de aquí con lo que se convierte en las categorías del mismo entendimiento.

La postura crítica adoptada por la filosofía kantiana y, a partir de ella, por un gran número de filósofos hasta nuestros días, ratifica a nivel de los principios una postura de hecho: no hay diálogo posible con una ciencia cuyo discurso es mítico. Define la empresa científica como muda y sistemática, cerrada sobre sí misma. De hecho, la filosofía ratifica y estabiliza la situación de ruptura, abandona a la ciencia el campo del saber positivo para reservarse la meditación sobre la existencia humana, sobre la apertura que constituye la libertad del hombre, en pocas palabras, sobre todo lo que hay en el hombre que suponga trascender las determinaciones positivas «naturales».

La naturaleza antigua era fuente de sabiduría, la medieval hablaba de Dios, en los tiempos modernos su silencio era tal que Kant con-

sideró necesario separar completamente ciencia y sabiduría, ciencia y verdad. Esta dicotomía aún perdura después de dos siglos. Tenemos prisa de que llegue a su fin y, desde un punto de vista científico, parece que hoy se dan las condiciones necesarias para que así sea.

Una de las cuestiones decisivas a este respecto es la siguiente: ¿será posible una nueva filosofía de la naturaleza que permita pensar de manera coherente en la inserción del hombre en la naturaleza y en las perspectivas mostradas por la ciencia?

3. *¿Una filosofía de la naturaleza?*

Hemos dicho que las primeras tentativas post kantianas de filosofía de la naturaleza se dirigieron a afirmar la posibilidad de un pensamiento sistemático distinto de la ciencia, a saber, francamente hostil, la posibilidad de una especulación liberada de las ligaduras del diálogo experimental identificadas a los límites del entendimiento. Independientemente de todo juicio de valor sobre estas filosofías de la naturaleza corremos el riesgo de juzgar desastrosa la situación cultural que han contribuido a crear. Para la mayor parte de los científicos, la filosofía de la naturaleza se ha vuelto sinónima de especulación orgullosa y divisoria, llena de desprecio por los hechos y que los hechos no han dejado de ridiculizar a su vez. Para ciertos filósofos, se ha vuelto el símbolo hiriente del peligro que encierra el ocuparse de la naturaleza y rivalizar con la ciencia. Se encuentra así acentuada una tendencia al enclaustramiento general que, en particular, corta a la filosofía de una de sus fuentes tradicionales de reflexión y a la ciencia de los medios de reflexionar sobre su práctica. Los científicos se encierran en el siglo XIX dentro de los más altos lugares protegidos de la Academia recientemente organizada, para llevar a cabo en el «ascetismo intelectual» una investigación de la cual aseguran la autonomía y el desinterés en relación con las preocupaciones de la sociedad que los cobija [11].

Así, la química y la ciencia del cuerpo vivo, la fisiología, estas dos ciencias en donde Diderot había visto la esperanza de una renova-

---

[11] J. Ravetz ha estudiado en *Scientific Knowledge and its Social Problems* (Penguin University Book, 1973) las consecuencias del encierro académico sobre la práctica científica y los difíciles problemas ante los cuales se encuentra una ciencia que quiere salirse de este refugio. Véase también J. Ben David, *op. cit.*

ción de la interrogación racional de la naturaleza, van a hacerse ciencias académicas por excelencia, limitarse, especialmente como reacción deliberada y reflexionada contra los filósofos de la naturaleza, a una práctica experimental hostil a toda especulación intelectual. En particular, en Giessen, en donde Liebig acababa de crear el primer laboratorio universitario de tipo moderno [12], se constituye una primera generación de químicos que escapan a la inquietud de la especulación emprendiendo con entusiasmo el análisis sistemático de la composición química de todos los objetos posibles.

¿Cómo, sin embargo, cuando se estudia la actividad de la materia y la del ser vivo, evitar tomar una postura sobre la relacion entre las conclusiones de estos estudios y los problemas filosóficos de la naturaleza del hombre y de su lugar en el mundo? Muy sencillamente, retomando la separación kantiana en el seno del orden de las preguntas; la única postura filosófica aceptable para un químico o un fisiólogo «serio» del siglo XIX, es una forma de kantismo implícito y confesado, que justifica el que se limite a unas investigaciones sistemáticas en el interior de un cuadro conceptual dado.

La figura más acabada de este tipo de «kantismo» es Helmhotz, químico, médico, físico y fisiólogo, quien dóminó la universidad alemana cuando esta última se convertía en modelo y centro de la ciencia europea. Es él quien declara que todos los «fenómenos de la naturaleza deben ser reducidos a los movimientos de partículas materiales que poseen fuerzas motrices invariantes, dependientes solamente de su situación espacial» [13]. Comprender la naturaleza es comprenderla en términos mecánicos. La mayor parte de los fisiólogos de la poderosa escuela alemana (Liebig, Ludwig, Müller, Du Bois-Reymond, Virchow) están de acuerdo con Hemholtz en lo esencial: el

---

[12] W. Farrar, «Science and the German University System, 1790-1850», en *The Emergence of Science in Western Europe.*

[13] H. Helmholtz, *Über die Erhaltung der Kraft,* 1847, recogido en S. Brush, *Kinetic Theory,* vol. 1, *The Nature of Gases and Heat,* Oxford, Pergamon, 1965 (cita p. 92). En este contexto, véase Y. Elkana, *The Discovery of the Conservation of Energy,* Londres, Hutchinson Educational, 1974, y P. M. Heimann, «Helmholtz and Kant: The Metaphysical Foundations of "Über die Erhaltung and Kraft"», en *Studies in the History and Philosophy of Science,* vol. 5, 1974, pp. 205-238. Sobre este tema encontraremos la exposición del mismo Helmholtz en el magnífico libro de Wilhelm Ostwald, *Los grandes hombres* (Die grosse Männer), que constituye un balance y una reflexión crítica sobre la institucionalización de la ciencia acontecida durante el siglo XIX.

funcionamiento fisicoquímico del ser vivo está sometido a las mismas leyes que la materia inanimada y debe ser estudiado en los mismos términos. No excluyen que una «fuerza vital» exista, que explique el desarrollo de la particularidad de lo vivo; pero como esa fuerza no interviene de manera causal, no participa en la economía de las fuerzas fisicoquímicas que la ciencia estudia, no es, no puede ser para ellos, objeto de ciencia [14]. La fisiología en tanto que es ciencia objetiva debe estudiar el funcionamiento de lo vivo tal cual, como dado, sin cuestionar su esencia o su génesis. El vitalismo es, pues, en el siglo XIX ampliamente aceptado por los medios científicos, pero constituye una convicción subjetiva asociada a una actividad científica objetiva y perfectamente reduccionista.

Reduccionismo contra antirreduccionismo, conflicto en el centro de la cultura científica, nacido en el siglo XIX y que sigue separándonos —constituye la huella, la cicatriz dejada por la ruptura con el pensamiento filosófico—. Pero es idealmente un punto sensible, uno de aquellos a propósito de los cuales, de vez en cuando, tal o cual filósofo se siente lo bastante seguro para pedir cuentas a los científicos, también uno de aquéllos a causa del cual tal o cual científico abandona, pasa al «otro campo», al de los filósofos —Driesch es un famoso ejemplo—.

Otro campo, en efecto, ya que desde el fin de la relativa unanimidad del siglo XVIII, el problema del devenir y de la complejidad se encuentra planteado de otra manera. Quisiéramos, sin entrar en detalle, citar un ejemplo eminente de pensamiento filosófico a la búsqueda, contra el reduccionismo científico, de una coherencia nueva: la filosofía hegeliana integra la naturaleza, ordenada en niveles de complejidad creciente, en un cuadro del devenir mundial del espíritu. El reinado de la naturaleza se acaba con el espíritu consciente de sí mismo del hombre.

Se puede decir, en pocas palabras, que la filosofía hegeliana de la naturaleza construye un sistema de todo lo que la ciencia newtonia-

---

[14] Esta postura debe situarse en el contexto de la conservación de la energía (Y. Elkana, *op. cit.*, y la sección 2 del capítulo IV de este libro). El mecanismo de Helmholtz y de sus colegas, para quienes la «fuerza vital» no es el objeto de la ciencia al no pertenecer al balance invariante de las energías naturales, debe distinguirse del militante materialismo mecanicista de Buchner, Moleschott, Vogt, analizado recientemente por F. Gregory, *Scientific Materialism in nineteenth Century Germany*, Dordrecht-Holland, Reidel, 1977.

na negaba y, en particular, de la diferencia cualitativa entre el comportamiento simple descrito por la *mecánica* y el de los *seres más* complejos. Se opone a la idea de reducción, a la idea de que las diferencias no son más que aparentes y que la naturaleza es fundamentalmente homogénea y simple, la idea de una jerarquía en cuyo seno cada nivel está condicionado por el nivel anterior, al que sobrepasa y del cual niega las limitaciones para, a su vez, condicionar el nivel siguiente, que manifestará de manera más adecuada, menos limitada, el espíritu que obra en la naturaleza.

Contrariamente a los autores newtonianos de «novelas de la materia», de panoramas mundiales que se extendían desde las interacciones gravitacionales hasta las pasiones humanas, Hegel sabía perfectamente que esta idea de la distinción de niveles —que podemos reconocer, independientemente de su propia interpretación, como correspondiendo a una complejidad creciente y a un significado cada vez más rico de la noción del tiempo— debía fundamentarse *en contra* de la ciencia matemática de la naturaleza. Iba a intentar limitar la importancia de esta ciencia, es decir, mostrar que las posibilidades de matematizar los comportamientos físicos se restringen a los más triviales de esos comportamientos. La mecánica es matematizable porque no atribuye a la materia más que propiedades exclusivamente espacio-temporales. «Un ladrillo no mata a un hombre porque es un ladrillo, sino que produce este resultado solamente en virtud de la velocidad que adquirió; lo que quiere decir que el hombre murió a manos del espacio y del tiempo» [15]. El hombre murió a manos de lo que llamamos una energía cinética ($mv^2/2$), es decir, por una magnitud abstracta que define masa y velocidad como intercambiables; para el mismo efecto se puede disminuir la una si se aumenta la otra.

Es precisamente este carácter intercambiable, del cual Hegel hace una condición de la matematización, que desaparece cuando se sobrepasa la esfera mecánica hacia la esfera superior. El comportamiento de la materia se vuelve entonces más y más *específico*. El ladrillo, por ejemplo, ya no será una masa en movimiento, sino un cuerpo dotado de propiedades de densidad, de conductividad térmica, de resistencia.

Abandonemos aquí el sistema hegeliano. Solamente queríamos subrayar que constituye una respuesta filosófica extremadamente exigente y rigurosamente articulada al problema crucial planteado por

[15] *Filosofía de la Naturaleza*, párrafo 261.

el tiempo y la complejidad. Pero ha encarnado, a los ojos de generaciones de científicos, el objeto por excelencia de revulsión y de burla. En algunos años, a las dificultades intrínsecas del pensamiento hegeliano se había añadido por otra parte, en lo que concierne a la filosofía de la naturaleza, la completa oscuridad de la mayor parte de las referencias científicas que habían permitido a Hegel describir la lógica del desarrollo del espíritu en la naturaleza. Porque Hegel se había apoyado, en su oposición al sistema newtoniano, en hipótesis científicas de su época [16]. Peo estas hipótesis cayeron en el olvido con excepcional rapidez. Desde el punto de vista de la historia de las ciencias es difícil imaginar peor momento que este principio del siglo XIX para buscar en los conocimientos científicos el apoyo necesario a un proyecto de alternativa a la ciencia newtoniana. En esa época, las teorías que parecían incompatibles con la ciencia newtoniana y con la matematización en general, habían proliferado, en física en particular, siendo abandonadas muchas en algunos años: la matematización empezaba solamente a desplegar sus efectos. En particular, el descubrimiento de la conservación de la energía unificó aquella cuya heterogeneidad fundamental Hegel había querido subrayar.

No profundizaremos en el detalle de las filosofías de la naturaleza propuestas a lo largo del siglo XIX. Hemos preferido hablar de las filosofías románticas y hegelianas porque pudieron ser, durante un período breve, rivales posibles de la ciencia positiva; correlativamente, la desconsideración de la construcción conceptual y de la intuición totalizante contribuyó a estabilizar el divorcio cultural que descubrimos. Al final del siglo XIX, cuando Bergson a su vez emprendía la búsqueda de una alternativa para la ciencia de su época que fuera aceptable para los científicos, se volvió de nuevo hacia la intuición, pero una intuición muy diferente de la ciencia de los románticos, una intuición de la cual dirá expresamente que no puede producir ningún sistema, sino resultados siempre parciales, no generalizados, expresados con infinita prudencia.

En adelante, es lo propio de la inteligencia productiva de la ciencia el generalizar, el alcanzar conocimientos a los cuales se pueden aplicar reglas. La intuición bergsoniana, es una atención tensa, una

---

[16] Es la conclusión de P. M. Knight en «The German Science in the Romantic Period», en *The Emergence of Science in Western Europe*. Las notas de Petry en su traducción al inglés de la *Filosofía de la Naturaleza* permiten reconstituir las referencias científicas de Hegel.

progresión cada vez más penosa a medida que se profundiza para penetrar en la singularidad de las cosas, para introducirse y cobijarse en ellas, participar en la duración que las constituye y todo ello sin posibilidad de abstracción, sin conclusión general. Cierto es que la intuición tendrá, para comunicarse, que pasar por el lenguaje, tendrá que «para transmitirse, cabalgar sobre ideas» [17]; lo hará con una prudencia y una paciencia infinitas, acumulando, para «abrazar la realidad» [18], las imágenes y las comparaciones concretas; llegará así a sugerir de manera cada vez más precisa lo que no puede ser expresado, ya que sólo la inteligencia puede expresarse, es decir, comunicar con palabras generales las ideas abstractas.

Así, ciencia y metafísica intuitiva «son o pueden llegar a ser igualmente precisas y ciertas. Una y otra se refieren a la realidad misma. Pero cada una sólo retiene la mitad, de manera que se podría ver en ellas, a voluntad, dos subdivisiones de la ciencia o dos departamentos de la metafísica, si no marcasen direcciones divergentes de la actividad del pensamiento» [19].

La definición de esas dos direcciones divergentes puede igualmente ser vista como el fruto de la historia; ya no se trata, para Bergson, de ver en las ciencias de la materia y de la vida una alternativa a la física de su época: esas ciencias, y se va a empeñar en demostrarlo, han tomado el mecanicismo como modelo. La esperanza racionalista que Diderot había fundado en el porvenir de la química y de la medicina está ya muerta. A los ojos de Bergson, la ciencia es un bloque y exige ser juzgada como bloque. Y es lo que hace Bergson cuando la explica como el producto de una inteligencia pragmática e industriosa, que apunta a hacerse dueña de la materia y que elabora por abstracción y generalización las categorías intelectuales adecuadas a este fin. La ciencia es el producto y la exigencia vital de sacar partido del mundo, sus conceptos están determinados por la necesidad de fabricar y de manipular los objetos, de prevenir y actuar sobre los cuerpos naturales. Es por lo que la mecánica racional constituye el modelo mismo de la ciencia, su encarnación pura, no siendo las otras ciencias más que manifestaciones más vagas, confusas, de una gestión

[17] H. Bergson, *La Pensée et le mouvant*, en *OEuvres*, éd. du Centenaire, París, P.U.F., 1970, p. 1285.

[18] H. Bergson, *op. cit.*, p. 1287.

[19] H. Bergson, *op. cit.*, p. 1286.

tanto más segura cuanto más inerte y desorganizado es el dominio explorado.

Por otra parte, el análisis bergsoniano no se detiene, como lo hizo Diderot, en oponer a la inercia de la masa física la actividad de la materia o, como lo hizo Stahl, la organización de lo vivo a la inestabilidad de los componentes materiales que lo constituyen. La crítica de la física se ha decantado al mismo tiempo que el mismo formalismo físico y todos los reproches dispersos pueden de ahora en adelante reducirse a uno solo, del cual los otros no son más que consecuencias: la inteligencia científica no puede comprender la *duración*, que reduce a una sucesión de estados instantáneos conectados por una ley de evolución determinista.

Sin embargo, «el tiempo es invención o no es nada» [20]; la naturaleza es ímpetu, continua elaboración de novedades, totalidad que se hace dentro de un desarrollo esencialmente abierto, sin finalidad predeterminada. «La vida progresa y dura» [21]. De esta progresión la inteligencia no puede comprender más que lo que puede movilizar bajo forma de elementos manipulables y calculables.

La física «se limita a contar las simultaneidades entre los acontecimientos constitutivos de este tiempo y las posiciones del móvil *T* sobre su trayectoria. Destaca estos acontecimientos del todo, que reviste a cada instante una nueva forma y que le transmite algo de su novedad. Los considera en el estado abstracto, tal como serían fuera del todo viviente, es decir, en un tiempo extendido en espacio. No retiene más que los acontecimientos o sistemas de acontecimientos que se pueden aislar así sin hacerle sufrir una deformación demasiado profunda, porque sólo ellos se prestan a la aplicación de su método. Nuestra física data del día en que se supo aislar semejantes sistemas» [22].

Cuando se trata de comprender la duración misma, la ciencia es impotente, hace falta la intuición, «visión directa del espíritu por el espíritu» [23]; «el cambio puro, la duración real, es cosa espiritual e impregnada de espiritualidad. La intuición es lo que alcanza el espíritu, la duración, el cambio puro» [24].

---

[20] H. Bergson, *L'Evolution créatrice*, en *Œuvres*, p. 784.
[21] H. Bergson, *op. cit.*, p. 538.
[22] H. Bergson, *op. cit.*, p. 784.
[23] H. Bergson, *La Pensée et le mouvant*, *op. cit.*, p. 1273.
[24] H. Bergson, *op. cit.*, p. 1274.

¿Puede hablarse de fracaso bergsoniano de la misma menera que no vacilaremos en hablar de fracaso en la filosofía de la naturaleza post-kantiana? Ciertamente sí, en el sentido en que la metafísica fundada sobre la intuición que Bergson quería crear no ha nacido. No en el sentido en que Bergson, contrariamente a Hegel, tuvo la buena fortuna de comenzar a juzgar una ciencia que, globalmente, estaba estabilizada, la ciencia clásica y su apoteosis; el balance crítico que Bergson hace de esta ciencia clásica ha podido así quedar inteligible para nosotros, en el sentido en que ya no se presenta a nuestros ojos como la definición de los límites eternos de la empresa científica, sino como un programa que empiezan a realizar la metamorfosis actuales de la ciencia. En particular, sabemos hoy que, efectivamente, el tiempo-movimiento, criticado por Bergson, no es suficiente más que para una categoría restringida de sistemas dinámicos simples. Pero no hemos llegado a esta conclusión por un abandono del método científico ni del pensamiento abstracto, sino a través del descubrimiento de las limitaciones intrínsecas de los conceptos puestos en marcha por la ciencia clásica. Trabajo intelectual que Bergson, sin duda, no habría despreciado, él que atribuía un valor tan ejemplar a la creación de las matemáticas infinitesimales: según él, los matemáticos y físicos para describir no ya el «todo hecho», sino «lo que se hace», es decir, el movimiento continuo, había realizado un prodigioso esfuerzo de «inversión», de la dirección habitual del trabajo del pensamiento. En este caso, al menos, las exigencias de la intuición, no del entendimiento, han estado en la base del «método más potente de investigación del cual dispone el espíritu humano» [25].

Aunque Bergson haya presentado así el análisis matemático infinitesimal como modelo de lo que la metafísica debería hacer —lo que ciertamente destruye la idea de una oposición fundamental entre la ciencia y la metafísica, o entre entendimiento e intuición— no podemos negar que, sin embargo, domina en él el mismo rasgo que notábamos en la mayor parte de los críticos post-kantianos de la ciencia. Como ellos, describe de manera perfectamente lúcida y pertinente las simplificaciones esenciales de la ciencia de su época e identifica de nuevo el estado histórico de las teorías científicas con la ciencia en general. Cuaja así la actividad científica, le atribuye en derecho sus límites históricos de hecho y se encuentra así en la posibilidad de concluir en la necesidad de definir una vez por todas los dominios res-

[25] Bergson, H. *op. cit.*, p. 1422.

pectivos y las cuestiones propias de la ciencia y de otras actividades culturales y filosóficas y, por consiguiente, el *statu quo* a respetar. Partición estática entre acciones juzgadas irremediablemente antagónicas y de las que solamente se puede esperar que coexistan sin llegar a destruirse.

¿Es aún posible una filosofía de la naturaleza que no sea contraria a una ciencia a la que niega posibilidades de invención y cuyos límites pretende definir de una vez por todas? Maurice Merleau-Ponty señaló la gravedad de las consecuencias de tan estéril partición, que dejaría la naturaleza para la ciencia, en tanto que la filosofía se reservaría la subjetividad humana y la historia: «El abandono en el que ha caído la filosofía de la naturaleza entraña una determinada concepción del espíritu de la historia y del hombre. Nos permitimos considerarlos pura negatividad. Por el contrario, volviendo a la filosofía de la naturaleza, nos desviamos de estos problemas preponderantes tan sólo en apariencia, buscamos encontrarles una solución que no sea inmaterialista» [26].

Sabemos que, cuando recordaba estos temas, Merleau-Ponty veía en la cosmología de Whitehead una importante tentativa en el terreno entonces desierto de la filosofía de la naturaleza. Queremos subrayar aquí algunos aspectos de la filosofía de Whitehead, fascinante tanto por su método resueltamente prekantiano como por su extraordinaria voluntad de alcanzar una consistencia que recorre y constituye su libro más importante, *Process and Reality*. Whitehead nos vuelve a poner en contacto con el verdadero significado de las filosofías clásicas. Aparte de dudas y discordancias, estas filosofías poseen la experimentación conceptual rigurosa, dominada por una aguda exigencia de consistencia.

Whitehead buscaba entender la experiencia humana como un proceso perteneciente a la naturaleza, como existencia física. Este desafío le condujo, por una parte, a rechazar la tradición filosófica que definía la experiencia subjetiva básicamente en términos de la conciencia, el pensamiento y la percepción sensorial y, por otra, a concebir toda existencia *física* en términos de goce, sentimiento, necesidad, apetito y anhelo, es decir, en contra de lo que él llama el «materialismo científico», que tiene sus raíces en la ciencia del siglo XVII. Al igual que Bergson, Whitehead señaló la inadecuación del esquema teórico que surge de la ciencia del siglo XVII:

---

[26] *Resumés de Cours 1952-1960*, París, Gallimard, 1968, p. 91.

«El siglo XVII había producido, finalmente, un modelo de pensamiento científico creado por matemáticos para uso de los matemáticos. La principal característica de la mente matemática es su capacidad para manejar abstracciones y para obtener a partir de ellas razonamientos demostrativos, precisos, siendo enteramente satisfactorio siempre que no nos apartemos de dichas abstracciones. El enorme éxito de las abstracciones científicas, presentándonos por un lado la materia y su simple localización en el tiempo y en el espacio y, por otro, la mente, percibiendo, sufriendo, razonando, pero sin interferir, ha obligado a la filosofía a aceptarlas como si de la descripción más concreta de los hechos se tratara».

«A partir de aquí la filosofía moderna se ha hundido, oscilando de forma compleja entre tres extremos. Por un lado tenemos los dualistas que aceptaron la materia y la mente sobre una base igualitaria y por el otro las dos variedades de monistas, aquellos que ponen la mente dentro de la materia y los que ponen la materia dentro de la mente. Pero estos juegos malabares de abstracciones no pueden nunca superar la confusión inherente introducida por la adscripción de una concreción que no posee, al modelo científico del siglo XVII.» [27]

Sin embargo, Whitehead consideraba este estado de cosas como una situación histórica y no como una cuestión de destino. La ciencia no está condenada a permanecer prisionera de esta confusión.

Anteriormente planteamos la cuestión de si es posible la existencia de una filosofía de la naturaleza que no esté dirigida contra la ciencia. La cosmología de Whitehead es el intento más ambicioso hasta la fecha de establecer tal filosofía. Whitehead no verá una contradicción básica entre la ciencia y la filosofía. Su trabajo, sin embargo, es el trabajo de un matemático. Su propósito era definir el problemático campo dentro del cual la cuestión de la experiencia humana y de los procesos físicos pudiera ser coherentemente tratada y determinar las condiciones bajo las cuales el problema podría ser resuelto. Lo que había que hacer era formular el conjunto mínimo de principios necesarios para caracterizar toda la existencia física, desde la de la piedra a la del hombre. Es precisamente el propósito universal de su cosmología lo que, en opinión de Whitehead, la define como una filosofía. Mientras que toda teoría científica selecciona y abstrae de entre la complejidad del mundo un conjunto peculiar de relaciones, la filosofía no puede favorecer ninguna región particular de la experien-

[27] A. N. Whitehead, *Science and the Modern World,* p. 55.

cia humana. Por medio de la experimentación conceptual debe construir una consistencia que pueda acomodar todas las dimensiones de esta experiencia, sin importar que pertenezcan a los campos de la física, fisiología, psicología, biología, ética, estética, etc.

De esta manera, Whitehead traza una cuidadosa distinción entre la abstracción científica en general, incluida la abstracción llevada a cabo con éxito por los científicos del siglo XVII y las generalizaciones de las que dichos científicos eran partidarios. Sin embargo, no pudo ir más allá y únicamente una ciencia conceptualmente más rica y diversificada podría haber tomado parte en el diálogo que él imaginó entre el enfoque que selecciona y abstrae y el enfoque que busca la coherencia, por ejemplo, el diálogo entre la ciencia y la filosofía.

Whitehead comprendió, quizá más claramente que nadie, que el devenir creativo de la naturaleza, es decir, el hecho último e irreducible que presupone toda la existencia física, no podía nunca ser concebido si los elementos que lo componen se definieran como entidades individuales y permanentes que mantuvieran su identidad a través de todo cambio e interacción. Pero, por otra parte, el hacer cualquier permanencia ilusoria, el negar el ser en nombre del devenir, las entidades en nombre de un flujo continuo siempre cambiante, significó el caer de nuevo en la trampa que siempre está tendida a la filosofía, por ejemplo, «la condescendencia con las explicaciones brillantes» [28]. Para Whitehead, la tarea de la filosofía iba a ser la de reconciliar la permanencia y el devenir, el concebir las cosas y los procesos, concebir el devenir como formador de entidades identificables, entidades individuales que nacen y mueren. Se encuentra más allá de nuestros objetivos el entrar en detalle en el sistema de Whitehead. Sea suficiente el decir que demuestra la conexión entre una filosofía de la *relación* —ningún elemento de la Naturaleza es un soporte permanente para las relaciones cambiantes, cada uno recibe su identidad de sus relaciones con los otros— y una filosofía del *devenir innovador*. En el proceso de su génesis cada ser unifica la multiplicidad del mundo, ya que añade a esta multiplicidad un conjunto adicional de relaciones. En la creación de cada nueva entidad, *the many become one and are increased by one* [29].

---

[28] A. N. Whitehead, *Process and Reality. An Essay in Cosmology*, The Free Press, Nueva York, MacMillan, 1969, p. 20.

[29] A. N. Whitehead, *op. cit.*, p. 26. «Los muchos se convierten en uno y aumentan de uno.»

En la conclusión de este libro, nos encontraremos de nuevo con la cuestión de Whitehead de la permanencia y el cambio, esta vez planteada en la física. Será entonces el momento de hablar de entidades formadas intrínsecamente por su interacción irreversible con el mundo. La física de hoy realmente ha descubierto la necesidad de mantener tanto la distinción como la interdependencia entre unidades y relaciones. Ahora, también reconoce que, para que una interacción sea real, la «naturaleza de las cosas relacionadas debe derivar de estas relaciones y, a la vez, también las relaciones deben derivar de la naturaleza de las cosas» (ver Conclusión, sección 1). Sin embargo, cuando Whitehead escribió *Proceso y realidad*, la idea física de las partículas elementales inestables, cuya existencia necesariamente implica devenir irreversible, se encontraba aún lejos de la física y la filosofía de Whitehead hubo de encontrar eco únicamente en biología [30].

¿Qué lección podemos sacar de esta rápida exploración de unos cuantos temas filosóficos? Si, yendo por caminos diferentes, ciencia y filosofía han de poder encontrarse y poner así fin a una oposición que quiebra nuestra cultura; si la ciencia debe poder ser un método del que participe la cultura y no una operación inaccesible, lejana y fascinante, debe terminar el reino de la abstracción que acaba por paralizar el objeto frente al sujeto. La naturaleza, objeto de la ciencia, es la que produce los hombres de ciencia; esta exigencia de comprensión coherente no debe ciertamente encontrar en las teorías científicas una respuesta única y suficiente, sino que debe tomar significado en el seno de la ciencia, poder ser entendida por los hombres de ciencia como tales.

De hecho, esta exigencia esencial es susceptible de tomar formas

---

[30] Joseph Needham y C. H. Waddington han reconocido la influencia de Whitehead en su investigación de una descripción positiva del organismo como un todo. Waddington, C. H., «The Practical Consequences of Metaphysical Beliefs on a Biologist's Work», en *Towards a Theoretical Biology*, tomo II, Edimburgo, University Press, 1969, y *The Ethical Animal*, Midway Reprint, Chicago, University Press, 1975; Needham, J., «A Biologist's View of Whitehead's Philosophy», en *Time, the Refreshing River*, Londres, Allen and Unwin, 1943.

No exploraremos aquí los fructíferos métodos de intervención directa de un pensamiento matemático inventivo en las ciencias de los seres vivos. Nos remitimos a los bellos análisis que René Thom dedicó a su método, especialmente sobre la posibilidad de que una teoría general abstracta ayude a alterar las categorías en términos, de las cuales el científico, como cualquiera de nosotros, se ve impulsado, casi de manera inconsciente, a descomponer lo real.

muy precisas. En particular, ninguna teoría científica debería bastar, como tal ciencia, para justificar una reducción del tiempo semejante a la que realiza la dinámica clásica. Negar el tiempo, esto es, reducirlo al desarrollo determinista de una ley reversible, es renunciar a la posibilidad de definir una naturaleza capaz de producir seres vivos y, en particular, el hombre; es condenarse a escoger entre una filosofía anticientífica y una ciencia alienante.

Ya lo hemos dicho varias veces, nuestra ciencia no es ya la ciencia clásica que criticaba Bergson. Ya dejó de serlo hace un tiempo, pero sin saberlo nosotros. La ciencia matematizada de la complejidad nació en el siglo XIX con la termodinámica. El problema del devenir entró en la física en ese momento. Pero, como veremos, los primeros efectos de dicho acontecimiento no fueron nuevas respuestas, sino paradojas, dificultades de la sorda inestabilidad de las categorías más establecidas. Hoy en día, podemos mirar atrás para ver que lo que surgía en medio de la confusión era la primera respuesta científica al problema de la complejidad natural y a la transformación cultural y tecnológica del mundo, a la muerte del mundo clásico.

Libro II

LA CIENCIA DE LA COMPLEJIDAD

Capítulo IV
LA ENERGIA Y LA ERA INDUSTRIAL

1. *El calor, rival de la gravitación*

«*Ignis mutat res*», este saber intemporal invocado por la divisa de los antiguos químicos hacía de la química, desde el origen, la ciencia del fuego. Esta ciencia del fuego fue reconocida como ciencia experimental en el curso del siglo XVIII antes de entrañar, en el centro de la ciencia moderna, el retorno de lo que esa ciencia negaba en el nombre de las tranquilas trayectorias de la dinámica, la irreversibilidad y la complejidad.

El fuego transforma las cosas, permite a los cuerpos entrar en reacción química, disolverse, dilatarse, fundirse o evaporarse y, claro, permite al combustible quemarse con gran desprendimiento de calor y llamas. De todo ello, como nadie ignora, el siglo XIX seleccionó esto: la combustión libera calor y el calor puede arrastrar una variación de volumen, es decir, puede producir un efecto mecánico. El fuego es capaz, entonces, de accionar máquinas de un género nuevo, máquinas térmicas, que en la misma época alumbran la sociedad industrial.

Era ésta una novedad técnica. Demos de ella un testimonio anec-

dótico [1]. Adam Smith trabajaba en *La riqueza de las naciones*, es decir, reunía los datos sobre las perspectivas y los determinantes del desarrollo industrial en la misma universidad en donde, al mismo tiempo, James Watt trabajaba en perfeccionar la máquina de vapor. Sin embargo, en su libro Adam Smith no imagina otro uso para el carbón que el de calentar a los obreros. En el siglo XVIII el viento, el agua y los animales y las máquinas simples que hacen funcionar, son en su mayor parte las únicas fuentes concebibles de la fuerza motriz de la que necesita, cada vez más, la industria.

La rápida difusión de las máquinas térmicas inglesas se acompaña de una nueva pregunta científica, de una nueva postura del problema de las transformaciones que el calor hace sufrir a los cuerpos. La pregunta que hizo nacer a la termodinámica no concierne a la *naturaleza* del calor, ni a su acción sobre los cuerpos, sino a *la utilización* de esta acción. Se trata de saber bajo qué condiciones el calor produce «energía mecánica», es decir, pueda hacer girar un motor [2].

Es siempre tentador y a veces útil elegir un acontecimiento simbólico, inaugural, la primera manifestación efectiva, influyente e identificable de la apertura de nuevas posibilidades. En lo que concierne a la ciencia de la complejidad, no vacilamos en hacerla «comenzar», en este sentido, a partir de 1811. En ese año, cuando los laplacianos triunfan y dominan la ciencia europea, el barón Jean-Joseph Fourier, prefecto de l'Isère, obtiene el premio de la Academia por su tratamiento teórico de la propagación del calor en los sólidos. A pesar de juntar sus fuerzas para criticar la nueva teoría, Laplace, Lagrange y sus alumnos han tenido que inclinarse [3]. El sueño laplaciano, en la hora de su mayor gloria, ha tenido un primer fracaso: existe ya una teoría física, matemáticamente tan rigurosa como las leyes mecánicas

---

[1] B. de Jouvenel, *La Civilisation de puissance*, París, Fayard, 1976, p. 11.

[2] Sobre el tema de la novedad de la cuestión físico-química, véase W. L. Scott, *The Conflict between Atomism and Conservation Theory*, libro II, y para una historia del desarrollo de la ciencia del calor en el contexto de la era industrial, D. S. L. Cardwell, *From Watt to Clausius*, Londres, Heinemann, 1971. Estos dos autores permiten comprender la coincidencia entre las exigencias determinadas por la era industrial y la simplificación positivista de los problemas acumulados por el siglo XVIII; así, un concepto como la presión estará definido por el protocolo experimental que permite definirla.

[3] J. Herivel, *Joseph Fourier, the Man and the Physicist*, Oxford, Clarendon Press, 1975. En esta biografía, Herivel revela un curioso detalle: Fourier había contraído en Egipto una enfermedad contagiosa que le hacía perder continuamente calor.

del movimietno y absolutamente extraña al mundo newtoniano; la física matemática y la ciencia newtoniana cesaron de ser sinónimas.

Como lo proclamaba el mismo Fourier, la propagación del calor entre dos cuerpos de temperaturas diferentes es un fenómeno *sui generis* que sería gratuito e ilusorio querer reducir a las interacciones dinámicas entre masas próximas entre sí. Su ley, de una elegante simplicidad, enuncia en efecto que el *flujo de calor entre dos cuerpos es proporcional al gradiante de temperatura entre estos dos cuerpos.* ¿Cómo poner ese proceso de propagación en relación con las fuerzas y las aceleraciones dinámicas? Pero, por otra parte, se trata de una ley tan general como las leyes newtonianas. Todo cuerpo tiene una masa y se encuentra así en interacción gravitacional con todos los demás cuerpos del Universo; pero todo cuerpo es igualmente capaz de recibir, de acumular y de transmitir el calor y, como tal, es la sede del conjunto de los procesos ligados a la acumulación y a la propagación del calor.

La formulación de las leyes de la difusión del calor tuvo un sentido más que simbólico: tanto en Francia como en Inglaterra, fue el punto de partida de historias diferentes cuyas prolongaciones llegan hasta nosotros.

En Francia, el fracaso del sueño laplaciano animó la separación positivista de la ciencia que Michel Serres ha analizado recientemente en varios casos [4]. El calor y la gravitación, dos universales, coexisten en física y, aún peor, como lo reconocerá Auguste Comte, son antagónicos: la gravitación obra sobre una masa inerte que la *sufre* sin ser afectada más que por el movimiento que adquiere o transmite; el calor *transforma* la materia, determina cambios de estado, modificaciones de propiedades intrínsecas. Sobre esta oposición, que recoge algunos de los temas de protesta de los químicos antinewtonianos del siglo XVIII y de todos los que habían subrayado la diferencia entre el comportamiento puramente espacio-temporal atribuido a la masa y la actividad específica de la materia, el positivismo construirá una clasificación de las ciencias, puestas bajo el signo común del orden, es decir, del equilibrio. Al equilibrio dinámico entre fuerzas se añade en adelante el equilibrio térmico, ya que la propagación del calor tien-

[4] Destaquemos la introducción a la *Philosophie première* de Augusto Comte (París, Hermann, 1975); «Auguste Comte autotraduit dans l'encyclopédie», en *La Traduction* (París, Minuit, 1974) y la sección «Nuage» en *La Distribution* (París, Minuit, 1977).

de siempre a establecer una distribución homogénea de las temperaturas en el cuerpo en donde se produce.

En Inglaterra, la teoría de la propagación del calor no tuvo como efecto el abandono de las tentativas de unificar el campo de los conocimientos y la afirmación de la especificidad de las disciplinas, cada una de ellas fundada sobre hechos irreducibles. Por el contrario, iba a constitiuir el punto de partida de una interrogación sobre la irreversibilidad que no ha dejado desde entonces de trastornar las separaciones y las clasificaciones [5].

Todos sabían que la ley de Fourier, si se aplica a un cuerpo aislado, caracterizado por una distribución de temperaturas no homogénea, describe el establecimiento de un equilibrio térmico: la propagación del calor tiene como efecto el igualar progresivamente y de manera monótona, la distribución de temperaturas hasta la homogeneidad final. Todos sabían que esta ley es irreversible en el sentido en el que el calor tiene esta propiedad fundamental, según la expresión empleada por Boerhaave, de siempre «repartirse», igualarse, de no concentrarse nunca y crear espontáneamente diferencias de temperatura. La ciencia de los fenómenos complejos, poniendo en juego la interacción de un gran número de partículas y la asimetría temporal se encontraban *de facto* ligadas desde el principio. Para comprender la manera en que esta unión fue reconocida e integrada por la física, debemos volver a recorrer el desarrollo de la ciencia del calor y el estudio de las diferentes fuentes que la alimentaron: métodos de física matemática, experimentación de laboratorio, desarrollo tecnológico, proyectos metafísicos.

De la misma forma que la mecáncia, la ciencia del calor implica a la vez una concepción del *objeto físico* y una definición de los *motores*, o dicho de otra manera, una identificación de la causa y del efecto dentro de un modo particular de producción de trabajo mecánico. Aclaremos esta doble característica.

Estudiar el comportamiento físico ligado al calor es definir un sistema no como en dinámica, por la posición y la velocidad de sus constituyentes (hay unas 10^{23} moléculas en un volumen de gas o fragmen-

[5] C. Smith, «Natural Philosophy and Thermodynamics: William Thomsom and the Dynamical Theory of Heat», en *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 9, 1976, pp. 293-319, y M. Crosland y C. Smith, «The transmission of Physics from France to Britain, 1800-1840», en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 9, 1978, p. 161.

to de sólido del orden del cm^3), sino con un conjunto de parámetros macroscópicos. Esos parámetros definen la composición del sistema y también (condiciones de contorno) sus relaciones con el resto del mundo definido, por consiguiente, como «medio».

Tomemos el ejemplo del calor específico, una de las propiedades fundamentales de todo sistema físico-químico. El calor específico mide la cantidad de calor a dar a un sistema de composición química determinada para elevar en un grado su temperatura, manteniendo sea el volumen, sea la presión a un valor constante. Para estudiar el calor específico a volumen constante se actúa sobre el sistema por medio de sus condiciones de contorno; se modifican algunas conservando las otras invariables; para el caso, se da al sistema una cantidad determinada de calor manteniendo el volumen constante pero dejando variar libremente la presión. El calor específico permite predecir cómo reaccionará el sistema a esta interacción con el medio.

De forma general es posible, por medio de las condiciones de contorno, ejercer sobre un sistema material una acción *mecánica* (un dispositivo con pistón puede, por ejemplo, permitir fijar la presión *o* el volumen del sistema), *térmica* (es posible dar o quitar una cantidad determinada de calor al sistema, o llevarlo, por intercambios caloríficos, a una temperatura determinada), o bien una acción *química* (flujo de reactivos y de productos de reacción entre el sistema y el medio). Presión, volumen, composición química, temperatura y cantidad de calor constituyen los parámetros físico-químicos clásicos, en función de los cuales pueden definirse las propiedades más generales de los sistemas materiales. La *termodinámica* es la ciencia de las variaciones correlativas de esas propiedades. Así, el objeto termodinámico implica, con respecto al objeto dinámico, un punto de vista nuevo sobre las transformaciones físicas. Ya no se trata de observar una evolución, de preverla calculando el efecto de las interacciones entre elementos del sistema. Se trata de *obrar* sobre el sistema, de prever sus reacciones a una modificación *impuesta*. La descripción descansa sobre los cambios sufridos por el estado macroscópico como tal, sobre la forma según la cual la variación de un *parámetro* influye sobre el valor de todos los demás.

Por otra parte, un *motor* mecánico se limita a restituir, en forma de trabajo, la energía potencial que una interacción anterior con el mundo le había conferido: la causa y el efecto son de la misma naturaleza y, de manera ideal, equivalentes. En un motor térmico, los intercambios de calor con el mundo conllevan para un sistema ma-

terial dado un *cambio de estado*, lo que implica, entre otros, un cambio de propiedades mecánicas: dilatación o contracción. El trabajo mecánico, el movimiento del pistón, resulta de una transformación intrínseca del sistema y no de una simple transmisión de movimiento.

Así pues, el motor térmico no es un dispositivo pasivo, *produce*, a decir verdad, movimiento [6]. Allí está el origen del nuevo problema planteado por el cálculo de su rendimiento: después de un cambio de estado productor de movimiento, para que la capacidad del sistema de producir movimiento a partir del calor sea *restablecida* hace falta prever un *segundo* proceso que devuelva el sistema a su estado inicial, un segundo cambio de estado que *compense* el cambio productor de movimiento. En un motor térmico, ese segundo proceso, a la vez equivalente e inverso del primero desde el punto de vista de la transformación del sistema motor, es un *enfriamiento* que permite al sistema recobrar su temperatura, su presión y su volumen iniciales cediendo calor al mundo.

El problema del rendimiento de los motores térmicos, de la relación entre el trabajo producido y el calor que hace falta dar al sistema *para que los dos procesos se compensen*, es ese punto que buscamos, en donde la noción de proceso irreversible se ha introducido en física. Mostraremos, más adelante, la importancia de este episodio crucial, de la ley de Fourier y del contexto cultural y técnico. Pero, muy ciertamente, es la nueva unificación de la física por el principio de conservación de la energía la que jugó el papel decisivo.

2. *El principio de conservación de la energía*

Ya hemos mencionado el papel esencial desempeñado por la energía en mecánica: el Hamiltoniano, suma de las energías cinética y potencial expresadas en variables canónicas, genera la evolución de estas variables conservándose a sí mismo en el curso de ese movimiento. La evolución dinámica modifica solamente la importancia respectiva de las dos energías.

A principios del siglo XIX [7] se produjo una explosión experimen-

---

[6] Esto ha sido particularmente resaltado por Michel Serres; véanse las referencias citadas en la nota 4 de este capítulo y el magnífico «Turner traduce a Carnot» (en *La Traduction*»).

[7] En lo que sigue, véase Y. Elkana, *The Discovery of the Conservation of Energy*,

tal sin precedentes: se descubrieron gran número de «efectos nuevos» en el laboratorio, que impusieron a los físicos la idea de que el movimiento no produce solamente modificaciones en la disposición espacial de los cuerpos, o dicho de otra manera, en el valor de la energía potencial. En efecto, esos procesos aislados en el laboratorio constituían una verdadera red que conectó finalmente entre sí los diferentes campos experimentales que habían proliferado recientemente en física y los que, como la mecánica, estaban constituidos desde hacía tiempo en disciplina. El movimiento, en particular, era capaz de provocar cada uno de los fenómenos estudiados en el curso de esos experimentos.

De esta conexión entre los diferentes campos, Galvani hizo la demostración sin premeditación. Hasta entonces, los electricistas no conocían las cargas eléctricas más que inmóviles. Galvani creó, con el cuerpo de una rana, el primer circuito eléctrico experimental. Pronto Volta iba a reconocer en las contracciones «galvánicas» de la rana el efecto del paso de una *corriente* eléctrica. A partir de 1800 Volta pone a punto una pila química: las reacciones químicas pueden producir electricidad. Después viene la electrolisis: la corriente eléctrica puede modificar las afinidades químicas, provocar reacciones químicas. Pero la corriente también provoca la producción de luz y de calor y, en 1820, Œrsted muestra que tiene efectos magnéticos. En 1822, Seebeck establece que, a la inversa, el calor puede producir corriente y, Peltier, en 1834, muestra cómo enfriar un cuerpo gracias a la electricidad. Por fin, en 1831, Faraday pone de manifiesto la producción de corriente inducida por efectos magnéticos.

Finalmente, en 1847, Joule da un paso decisivo: la conexión entre la química, la ciencia del calor, la electricidad, el magnetismo y la biología es interpretada como una *conversión*. La conversión generaliza lo que se produce en el curso de los movimientos mecánicos: a través de todos los fenómenos estudiados en el laboratorio se postula que «algo» se conserva cuantitativamente y cambia de forma cualitativa. Para definir las relaciones entre esas formas cualitativas, Joule define un *equivalente* general de las transformaciones físico-químicas que da la forma de medir la magnitud que se conserva y que más tar-

así como el magnífico artículo de Thomas Kuhn, «Energy Conservation as an Exemple of Simultaneous Discovery» (publicado por primera vez en *Critical Problems in the History of Science*, éd. M. Clagett y reeditado en T. Kuhn, *The Essential Tension*, Chicago, The University Press, 1977).

de será identificada como «energía» [8]. Establece la primera equivalencia midiendo el trabajo mecánico necesario para elevar en un grado la temperatura de una cantidada dada de agua. La ciencia cuantitativa de los procesos físico-químicos es, desde entonces, reconocida en su unidad. La conservación de una magnitud física, la energía, a través de las transformaciones que pueden sufrir los sistemas físicos, químicos, biológicos, va desde entonces a ser colocada en la base de lo que podemos llamar la ciencia de lo complejo. Va a constituir el hilo conductor que permitirá explorar de manera coherente la multiplicidad de los procesos naturales.

No hay nada de extraño en que el principio de conservación de la energía haya tomado una importancia extrema a los ojos de los físicos del siglo XIX. Para muchos de ellos, es la naturaleza entera, y no solamente los diferentes campos experimentales, la que se encuentra así unificada. Joule traduce este convencimiento en el contexto cultural propio de Inglaterra. «En efecto, los fenómenos naturales, sean mecánicos, químicos o vitales, consisten casi exclusivamente en una conversión de la atracción, a través del espacio, de la fuerza viva *(NB*, energía cinética) y del calor la una en el otro. Y así es como el orden del Universo se mantiene: nada se perturba, nada se pierde jamás, pero la maquinaria toda, por muy complicada que sea, funciona con calma y armonía. Y a pesar de que, como en la terrible visión de Ezequiel, "la rueda puede estar en medio de la rueda" y que cada cosa pueda aparecer complicada y embrollada, en la confusión e intrincamiento aparentes de una diversidad casi sin fin de causas, de efectos, de conversiones y de composturas, queda preservada la más perfecta regularidad, estando gobernado el todo por la voluntad soberana de Dios» [9].

El caso de los alemanes Helmholtz, Mayer, Liebig —pertenecientes los tres a una cultura en la cual el tipo de argumento de Joule se repudiaba en nombre de una práctica estrictamente positiva— es todavía más llamativo. En el momento de su descubrimiento, ninguno de estos tres investigadores era, a decir verdad, un físico. En cambio, los tres se habían ocupado de la fisiología de la respiración: es nece-

[8] Elkana se ha propuesto seguir la lenta formación del concepto de energía (véase su libro y «Helmholtz's Kraft: an Illustration of Concepts in Flux», en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 2, 1970, pp. 263-298).

[9] J. Joule, «Mater, Living Force and Heat», en *The Scientific Papers of James Prescott Joule*, vol. 1, Londres, Taylor and Francis, 1884, pp. 265-276 (cita p. 273).

sario decir que, desde Lavoisier, la fisiología de la respiración constituía un problema modelo, el primero en el cual el funcionamiento del ser viviente se encontraba descrito en términos físicos y químicos —combustión del oxígeno, desprendimiento de calor, trabajo muscular; era, pues, el mismo tipo de problema que debía atraer a los fisiólogos y a los químicos hostiles a las especulaciones románticas, ávidos por participar en la construcción de una ciencia positiva. Sin embargo, al leer la forma en que estos tres investigadores «saltaron» a la conclusión de que, primero la respiración e, inmediatamente después, la naturaleza entera, se encuentran sometidas a una equivalencia fundamental, se puede concluir que el pasado filosófico de Alemania les había, de hecho, «impregnado» de una idea muy extraña al conocimiento estrictamente positivo que pretendían practicar: la idea de que la naturaleza, en su totalidad y sin resto, está unificada por una legalidad general, por un principio de causalidad único.

La historia de Mayer es la más espectacular [10]: joven médico en las colonias holandesas de Java, observó el rojo vivo de la sangre venosa de uno de sus pacientes, imponiéndose la conclusión de que, dado que en los trópicos hace más calor, los habitantes necesitan quemar menos oxígeno para mantener la temperatura del cuerpo, lo que se traduce en el color rojo de su sangre. Y Mayer, a partir de ahí, construye un balance entre, por una parte, el consumo de oxígeno, que llamaríamos fuente de energía y, por otra parte, los consumos ligados al mantenimiento de la temperatura (a pesar de las pérdidas térmicas) y al trabajo manual. Ese balance, en sí mismo, ya sobrepasa ampliamente la observación de partida: el color de la sangre podía quizá haber estado ligado a la «pereza» del paciente de Mayer. Pero el balance mismo no constituye más que la primera generalización, ya que Mayer «salta» a la conclusión de que no hay ahí sino una manifestación particular de la presencia de una fuerza única e indestructible que está en la base de todos los fenómenos de la naturaleza, viva e inanimada [11].

[10] Véase la historia en *Los grandes hombres* de Ostwald; el libro se basa en el análisis biográfico de conocidos hombres de ciencia del siglo XIX, con el objeto de descubrir las condiciones de un rendimiento óptimo de los hombres de ciencia, en aplicación de la doctrina energética y teniendo en cuenta la amenaza de agotamiento y de derrumbamiento nervioso al final de todo esfuerzo interno. Señalemos la intrépida lectura que hace J. Lacan *(L'Evolution psychiatrique,* fasc. II, p. 72).

[11] Se encontrará en *Energy: Historical Development of the Concept,* ed. R. B. Lindsay, Benchmark Papers on Energy, I. Pensylvania, Dowden, Hutchinson and Ross,

Esta «predisposición» a reconocer en las transformaciones naturales el producto de una realidad subyacente que se mantiene idéntica a sí misma a través de sus transformaciones evoca irresistiblemente una forma de kantismo, así como otra idea de algunos fisiólogos, a la cual solamente haremos alusión: aunque una fuerza «vital» se encuentre en la base del funcionamiento de los seres vivos, el *objeto* de la fisiología no deja de ser puramente físico-químico. Veremos cómo ha sido posible hacer del kantismo, que ratificó la forma sistemática que se dio la física matemática en el curso del siglo XVIII, una de las raíces de la renovación de la física en el curso del siglo XIX [12].

Helmholtz, el más representativo hombre de ciencia que participó en esta renovación, reconoció por otra parte muy claramente esta influencia [13]. Para él, el principio de conservación de la energía no era más que la encarnación, en el interior de la física, de la exigencia general de inteligibilidad de la naturaleza que es previa a toda ciencia: el postulado de una invariancia fundamental más allá de las transformaciones naturales. «El problema de la ciencia es, en primer lugar, la búsqueda de leyes gracias a las cuales los procesos particulares de la naturaleza pueden ser devueltos a, y deducidos de, leyes generales... Este procedimiento queda justificado e incluso viene forzado por la convicción de que cada cambio en la naturaleza *debe* tener una causa suficiente. Las causas próximas a las cuales los fenómenos pueden ser devueltos pueden, en sí mismas, ser variables o invariables; en el primer caso, la convicción en cuestión nos obliga a buscar causas que expliquen esta variación y así hasta que lleguemos a las causas finales, que son invariables y deben, pues, en todos los casos en donde las condiciones exteriores son las mismas, producir los mismos efectos invariables. La meta final de las ciencias teóricas de la naturaleza está en descubrir las causas últimas e inmutables de los fenómenos naturales.» Tal es la forma tomada por un cierto kantismo del siglo XIX: la conservación de la energía realiza lo que exige todo conocimiento racional y su descubrimiento constituye, en ese sentido, la coronación definitiva de la física y de toda ciencia positiva.

1975, la traducción inglesa de dos grandes artículos de Mayer, «On the Forces of Inorganic Nature» y «The Motions of Organisms and their Relation to Metabolism».

[12] Véanse las referencias de la nota 13 del capítulo III, y E. Benton, «Vitalism in the Nineteenth Century Scientific Thought: A Typology and Reassessment», en *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 5, 1974, pp. 17-48.

[13] H. Helmholtz, *Über die Erhaltung der Kraft*, *op. cit.*, pp. 90-91.

El principio de conservación de la energía tuvo una importancia enorme, no solamente en lo que concierne a las teorías científicas, sino también en cuanto a la imagen de la ciencia. Se impone la idea de una nueva edad de oro de la física, de un acabado y de una generalización última del tipo de razonamiento que había forjado el éxito de la mecánica. La ciencia de la energía, piensan muchos, recoge las diferentes teorías físicas y las engloba como otros tantos casos particulares en el seno de una concepción que es la verdad final de la física.

También la resonancia cultural fue inmensa: nueva concepción del hombre como máquina energética (Jacques Lacan, por ejemplo, ha mostrado en un texto publicado recientemente hasta qué punto era constitutiva de la teoría freudiana) [14]; nueva concepción de la sociedad como motor —referirse al análisis consagrado por Serres a la obra de Zola [15]; nueva concepción de la misma naturaleza, como «energía», es decir, potencia de creación y de producción de diferencias cualitativas.

Desde este punto de vista, el principio mismo es, por otra parte, ambiguo: la naturaleza que describe parece económica, bien compuesta, tranquila y controlable; se presenta como sumisa y reducida a los equivalentes experimentales. Bergson, en este sentido, no andaba descaminado al no ver nada de verdaderamente nuevo en la ciencia de la energía. Sin embargo, más allá de la impotencia a la cual la descripción científica había reducido a la naturaleza creadora y destructora, de la cual la ciencia bien había tenido que reconocer la potencia para ahogar sus «rugidos». La ciencia, que describe las transformaciones de la energía bajo el signo de la equivalencia, debe admitir, sin embargo, que sólo la *diferencia* puede ser productora de efectos que sean a su vez diferencias [16]. La conversión de la energía no es otra cosa sino la *destrucción* de una diferencia, la *creación* de otra diferencia. En esta perspectiva, la ciencia de la energía a la vez revela y disimula, bajo formas tradicionales, la potencia de la naturaleza. Antes que el dispositivo experimental, en donde la naturaleza productora está dominada, sumisa a una equivalencia preestablecida,

[14] J. Lacan, *Le Moi dans la théorie de Freud et dans la téchnique de la psychanalyse*, Séminaire II, 1954-1955, París, Seuil, 1978. Ya en su tesis (1932), subrayaba Lacan el carácter esencial del concepto de energía, todo ello en una óptica meyersoniana perfectamente coherente y, es necesario precisarlo, con referencias posteriores a Koyré.

[15] *Feux et signaux de brume. Zola*, París, Grasset, 1975.

[16] G. Deleuze, *Nietzsche et la philosophie*, París, P.U.F., 1973, pp. 48-55.

hace falta, para comprenderla, evocar la hornaza de las máquinas de vapor, el hervor de las transformaciones en un reactor químico, la vida y la muerte de los individuos y de las especies, otras tantas experimentaciones en donde se despliega su potencia creadora y destructora.

Esta convicción de que la naturaleza no es un sistema en orden, sino el sempiterno despliegue de un poder productor de efectos antagónicos, enfrentados en una lucha por la supremacía y el dominio, tiene ciertamente resonancias y raíces filosóficas; no está prohibido, sin embargo, oír también el ruido de las máquinas, no los aparatos de laboratorio, sino las máquinas industriales que, en menos de un siglo, habían producido efectos sin parecido con las máquinas simples, movidas por el agua, el viento y el trabajo animal o humano y que inspiraron la ciencia clásica [17].

3. *De las máquinas térmicas a la flecha del tiempo*

Pero si, como cabe pensar, el espectáculo de las máquinas térmicas, de la caldera al rojo vivo de las locomotoras en donde el carbón arde sin retorno para que se produzca movimiento, establece la más infranqueable distancia entre los espíritus clásicos y la cultura del siglo XIX, es notable que la física haya creído primero poder ignorar esta distancia, que haya creído poder describir las nuevas máquinas como las antiguas, desde el único punto de vista de las equivalencias y del rendimiento ideal, y descuidar este hecho nuevo de que lo que consumen las máquinas de vapor desaparece sin retorno. Ninguna máquina térmica restituirá al mundo el carbón que ha utilizado.

Así, la ciencia de la energía iba a emprender la descripción de la

[17] Michel Serres escribe en su ensayo sobre el «Doctor Pascal» de Zola *(Feux et signaux de brume*, p. 109): «El siglo que se acaba, o casi, cuando aparece la novela, se ha abierto a la estabilidad real del sistema solar, está ahora lleno de angustia ante las degradaciones implacables del fuego. De aquí el dilema, positivo y salvaje: ciclo perfecto, *sin residuo, eterno y valorizado*, la cosmología del sol, o ciclo fallido, que pierde su diferencia, irreversible, histórico y devaluado, una cosmogonía, una termogonía del fuego que debe o apagarse o destruirse, y esto, implacablemente. Soñamos con Laplace cuando Carnot y otros han roto la caja para siempre, el nicho en donde podíamos dormir en paz, soñamos, esto es seguro: entonces, los arcaísmos culturales, retornando por otra puerta, por otra abertura de la misma puerta, se reactivan fuertemente: ¿alma inmortal, brasas purificantes o fuego malo?»

naturaleza misma como un conjunto de dispositivos de conversión, regidos por balances reversibles, aun cuando se había convertido para todo el mundo en la reserva de máquinas, amenazada de agotamiento definitivo. Pensamos que tal es la situación en donde tiene sus raíces la ulterior transformación de la física. En todo caso, el concepto de irreversibilidad física traduce este miedo de la física de la conservación: el mundo se consume como en un horno, sin restauración concebible; es entonces necesario que la energía, aun conservándose, se disipe.

Todo había empezado de forma muy clásica: la termodinámica, nacida con el trabajo de Sadi Carnot sobre la potencia motriz del fuego, en 1824, había conseguido reducir el estudio de las máquinas térmicas al modelo de las máquinas clásicas, de las cuales Lazare Carnot, el padre de Sadi, había producido la primera y más influyente de las descripciones sistemáticas. El funcionamiento de las máquinas simples supone el movimiento como dado: se limita a transformarlo y transferirlo a otros cuerpos. Asimismo, Carnot hijo «se dará» el flujo de calor: dos fuentes de temperaturas dadas, una fría y otra caliente. Así, de un solo golpe, la ciencia ha silenciado a las hornazas; en adelante sólo el *efecto* de la combustión le interesa: el mantenimiento en el seno de un sistema motor, de un cuerpo a temperatura caliente y de otro a temperatura fría.

Este gesto fundador era tanto más fácil para Sadi Carnot que, con la mayoría aplastante de los científicos de su tiempo, identificaba el calor a un fluido, conservado en cantidad constante a través de todas las transformaciones que provoca. En este caso, darse dos fuentes de calor es, simplemente, descuidar el proceso por el cual la combustión química genera energía calórica, de la misma manera que un constructor de máquinas simples ignora de dónde vienen el viento, la fuerza de los animales o el agua de los ríos.

Sean, por tanto, dos fuentes. La una cederá energía calórica al sistema motor; la otra, de temperatura diferente, absorberá la energía calórica cedida por la primera, y es el *movimiento* de la energía calórica a través del motor, entre las dos fuentes de temperaturas diferentes, el que, potencia motriz del fuego, moverá el motor, tal como el agua que cae entre dos niveles diferentes puede mover un molino. Y Carnot formula la pregunta de su padre [18]: «¿Qué máquina tendrá

[18] Cardwell *(From Watt to Clausius)* y W. L. Scott *(The Conflict between Atomism and Conservation Theory)* señalan la filiación intelectual.

el rendimiento ideal? ¿Cuáles son las fuentes de las pérdidas? ¿Qué procesos tienen como consecuencia que el calor fluya sin producir trabajo?» Lazare Carnot había concluido: para que una máquina mecánica tenga mejor rendimiento, hace falta que su construcción y régimen de funcionamiento sean tales que los choques, rozamientos, cambios bruscos de velocidad, en resumen, todo lo que proviene de la puesta en contacto brusca de cuerpos de diferentes velocidades, sean evitados al máximo. Extraía así las conclusiones de la física de su época: sólo los fenómenos continuos son conservativos, todos los cambios abruptos de movimientos determinan la pérdida sin posibilidad de retorno de la «fuerza vital». *La máquina térmica ideal,* en vez de evitar toda puesta en contacto de cuerpos de *velocidades* diferentes, evitará toda puesta en contacto de cuerpos de *temperaturas* diferentes. El ciclo será concebido de tal forma que ningún cambio de temperatura resulte de un flujo directo de calor entre dos cuerpos de temperaturas diferentes: tal flujo, no teniendo ningún efecto mecánico, de dilatación o de contracción, constituye una pérdida integral de rendimiento.

El ciclo ideal de Carnot realiza así la paradoja de un transporte global entre dos fuentes de temperaturas diferentes sin ningún flujo directo de calor, sin puesta en contacto de cuerpos de temperaturas diferentes. Está dividido en cuatro fases. En el curso de cada una de las dos fases *isotermas,* el sistema está en contacto con cada una de las dos fuentes térmicas, *manteniéndose a la temperatura de cada una de las respectivas fuentes.* En contacto con la fuente caliente, absorbe calor y se dilata; en contacto con la fuente fría, pierde calor y es comprimido. Las dos fases isotermas están conectadas entre sí por dos fases en donde el sistema está *aislado* de las fuentes: el calor no entra ni sale del sistema, pero éste cambia de temperatura a consecuencia, respectivamente, de una dilatación y de una comprensión. El cambio de volumen prosigue hasta que el sistema haya pasado de la temperatura de una fuente a la de la otra (figura 2).

En 1850, Clausius describía el ciclo de Carnot en el nuevo marco de la conservación de la energía. Descubría que la necesidad de dos fuentes y la fórmula del rendimiento ideal enunciada por Carnot traducen el problema específico de los motores térmicos: la necesidad de un proceso compensador a la conversión (aquí, el enfriamiento por contacto con una fuente fría), que restituye el motor a su estado mecánico y térmico inicial. A las relaciones de balance expresando la conversión de la energía se añaden ahora nuevas relaciones de equi-

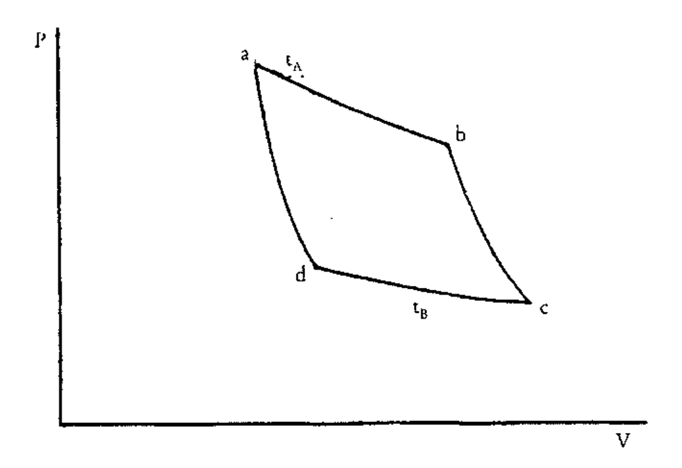


Figura 2. Ciclo de Carnot trabajando entre dos focos, uno a una temperatura t_A y el otro a una temperatura menor que t_A, t_B: Entre *a* y *b* tenemos una transformación isoterma: el sistema, mantenido a temperatura t_A, absorbe calor y se expande. Entre *b* y *c*, el sistema, aislado del exterior, se expande disminuyendo su temperatura de t_A a t_B. Los dos procesos crean energía mecánica al desplazar el pistón como resultado de la expansión. Entre *c* y *d*, el sistema se comprime isotérmicamente a temperatura t_B, cediendo calor al foco «frío». Finalmente, se sigue comprimiendo el sistema entre *d* y *a*, aislándolo para aumentar su temperatura hasta la del foco «caliente».

valencia entre los dos procesos, *flujo* de calor entre las fuentes y *conversión* de calor en trabajo, cuyos efectos se compensan desde el punto de vista del estado físico-químico del sistema. Ha nacido la termodinámica.

La interpretación de Clausius reviste una significación muy profunda, que tendrá ecos importantes: la naturaleza es ciertamente un depósito inagotable de energía y, ante todo, de energía térmica, pero no podemos disponer sin condiciones de esta energía. No todos los procesos que conservan la energía son posibles. No puede crearse diferencia alguna de energía sin la destrucción de una diferencia por lo menos equivalente. En el ciclo de Carnot, el trabajo producido se paga con un flujo de calor que *disminuye* la diferencia de temperatura de las fuentes. El trabajo mecánico producido y la disminución de la diferencia de temperatura están ligados, *de una forma ideal*, por una *equivalencia reversible:* la misma máquina, funcionando en sen-

tido contrario, puede restablecer la diferencia inicial al mismo tiempo que consume el trabajo producido.

Al igual que Carnot, Clausius no se interesa aún directamente, *en 1850*, por las pérdidas que para todo motor real acarrean un rendimiento inferior al rendimiento ideal previsto por la teoría. Desde este punto de vista, el status de la idealización es el mismo que el de las máquinas mecánicas descritas por Lazare Carnot: todos los balances reales son deficitarios, pero *sólo lo ideal es objeto de ciencia.*

Sin embargo, desde el siglo XVIII algo ha cambiado en el status de la idealidad. En efecto, la nueva ciencia, fundada sobre el principio de la conservación de la energía, no pretende ya describir una idealización, sino la naturaleza misma, *incluyendo las «pérdidas»*. De aquí este nuevo problema, en donde la irreversibilidad se introduce en física: ¿cómo describir, ya que ahora todo debe ser descrito y no solamente las idealizaciones, lo que ocurre en una máquina real? ¿Cuál es la naturaleza de las perturbaciones irreversibles que disminuyen el rendimiento?

La cuestión tecnológica planteada por Carnot y Clausius desemboca en una descripción de los motores ideales, fundamentada sobre la conservación y la compensación, pero también plantea una nueva cuestión: la de la disipación de energía. William Thomson, probablemente porque conocía y veneraba la obra de Fourier, va a ser el primero en condiciones de transformar esta cuestión en afirmación y en enunciar el segundo principio de la termodinámica.

Es, en efecto, precisamente *el fenómeno universal de la propagación del calor* que Carnot había identificado como origen de las pérdidas de potencia del motor térmico. La ley de Fourier se encontraba así asociada a la descripción de las pérdidas por conducción, que disminuyen el rendimiento de un motor térmico. El ciclo de Carnot, no ya el ciclo ideal, sino todo ciclo real, llega a a ser el punto de encuentro de las dos «univarsalidades» descubiertas por el siglo XIX, la de la conversión de la energía y la de la propagación del calor; y ya que la propagación no reversible del calor es, en este contexto, sinónimo de pérdida de rendimiento, se transformará, a partir de 1852, en tendencia a la degradación universal de la energía mecánica.

Thomson ha realizado así el salto vertiginoso de la tecnología de los motores a la cosmología. El mundo laplaciano era un mundo conservativo y eterno, hecho a la imagen de la máquina ideal simple. Dado que la cosmología de Thomson no está hecha solamente a imagen y semejanza de la nueva máquina térmica ideal, sino que encarna

también las consecuencias de la propagación no reversible del calor en un mundo en donde se conserva la energía, ese mundo estará descrito como una máquina en el seno de la cual la conversión del calor en movimiento no se puede realizar más que al precio de un desperdicio no reversible, de una inútil disipación de una cierta cantidad de calor. Las diferencias productoras de efectos no cesan de disminuir en el seno de la naturaleza; el mundo, de conversión en conversión, agota sus diferencias y se dirige hacia el estado final definido por Fourier, el estado de equilibrio térmico, en donde no subsiste ninguna diferencia productora de efectos.

Acabamos de explicar la formulación del segundo principio evocando el contexto propiamente científico: conservación de la energía, ciencia de los motores, ley de Fourier. Está particularmente claro, sin embargo, que el papel del contexto cultural ha sido al menos igual de importante. Podemos evocar esta cuestión desde dos diferentes puntos de vista. Por una parte, ya lo hemos señalado, está generalmente admitido que el tema del tiempo ha cobrado, en el siglo XIX, una singular importancia. Parece que, en todos los dominios, se descubre el carácter esencial del tiempo: evolución de las formaciones geológicas, de las especies, de las sociedades, de la moral, de los gustos, de los lenguajes. Por otra parte, se puede ciertamente afirmar que la forma específica bajo la cual se introduce el tiempo en física, a saber, la evolución hacia la homogeneidad y la muerte, resuena con muy antiguos arquetipos míticos y religiosos. Pero también aquí pueden descubrirse las repercusiones culturales de la mutación socioeconómica de la época. La rápida transformación del modo técnico de inserción en la naturaleza, el progreso que se acelera en el siglo XIX, despiertan una inquietud que atestigua, aún hoy, el éxito de proposiciones tales como «límites al crecimiento» o «crecimiento cero». La obsesión por el agotamiento de las reservas y por la detención de los motores, la idea de una decadencia no reversible, traducen ciertamente esta angustia propia del mundo moderno.

En 1865, Clausius efectuaba a su vez el paso característico entre tecnología y cosmología. Sin embargo, se limitaba aparentemente a repetir sus antiguas conclusiones, pero en un lenguaje nuevo, centrado alrededor del concepto de *entropía*. Ese lenguaje iba a hacer aparecer más claramente la problemática de la que surgió la termodinámica, la separación entre los conceptos de conservación y de reversibilidad: contrariamente a las transformaciones mecánicas, en donde coinciden los ideales de conservación y reversibilidad, una transfor-

mación físico-química puede conservar la energía sin necesidad de que sea invertible. Tal es el caso del rozamiento, en donde el movimiento se convierte en calor, o el de la difusión del calor descrita por Fourier.

En principio, Clausius trataba solamente de expresar de una forma nueva la exigencia que define todo sistema motor: su retorno al estado inicial una vez finalizado el ciclo, una vez que flujo y conversión de calor se han compensado. Era cómodo introducir a este efecto una «función de estado», una función que no depende más que del valor de los parámetros (presión, volumen, temperatura, cantidad de calor en el sistema) que permiten describir el estado del sistema [19]. De hecho, ya conocemos una función de estado, la energía. Pero caracterizar el paso entre dos estados del sistema por la variación de energía no basta; debemos ir más allá del simple principio de conservación de la energía y encontrar el medio de expresar la diferencia entre los flujos «útiles», los que compensan exactamente una conversión a lo largo del ciclo y los flujos «disipados», perdidos, los que en una inversión del funcionamiento del sistema no podrían ser devueltos a la fuente caliente. Tal es el papel de la función de estado S, la *entropía* [20].

---

[19] Ha sido necesario comprender que, contrariamente a lo que pasa en mecánica, cualquier situación de un sistema termodinámico no constituye un estado de ese sistema, sino muy al contrario. E. Daub en «Entropy and Dissipation» *(Historical Studies in the Physical Sciences,* vol. 2, 1970, pp. 321-354) analiza los múltiples malentendidos de Thomson y Tait ante la entropía de Clausius antes de que sus propiedades de función de estado fuesen bien comprendidas.

[20] M. Planck *(Autobiographie scientifique,* París, Albin Michel, 1960) recuerda cuán aislado estaba cuando subrayó la singularidad del calor y recordó que era la conversión del calor en otra energía la que planteaba problemas. Los energetistas como Oswald querían dar el mismo estatuto a todas las energías. Para ellos la caída de un cuerpo entre dos alturas constituía la puesta en marcha de una diferencia productora de esencialmente la misma naturaleza que la transferencia de calor entre dos cuerpos de temperaturas diferentes: esta asimilación borraba las diferencias entre un proceso *idealmente reversible,* como el movimiento mecánico, y un proceso *intrínsecamente irreversible,* como la difusión de calor. Hecho esto, los energetistas se encontraban de hecho en una postura muy próxima a la que hemos reconocido en Lagrange. En lugar de ver, como este último caso, en la *conservación de la energía* una propiedad no perteneciente más que a los casos ideales, pero que sería la única susceptible de un tratamiento riguroso, hicieron de la conservación de la energía una propiedad de *toda* transformación físico-química, pero vieron en la conservación de las *diferencias de energía* (necesaria para toda transformación, siendo una diferencia de energía la única capaz de producir otra diferencia) un caso «solamente ideal pero único posible objeto de ciencia rigurosa».

Después de cada ciclo, sea o no ideal, la entropía, función de estado del sistema, vuelve a su valor inicial. Pero es solamente en el caso de un ciclo ideal cuando la variación de entropía, dS, durante un tiempo muy corto dt, puede ser definida por una relación de equivalencia entre esta variación y los intercambios con el medio que, durante el tiempo dt, la provocan. Y es solamente en ese caso en el que una inversión del sentido de los intercambios entre sistema y medio se traduce en una variación del signo de la variación de entropía. En el caso de los ciclos no ideales, sólo una parte de dS, que llamaremos d_eS, posee estas propiedades: d_eS describe el «flujo» de entropía entre sistema y medio, el conjunto de transformaciones del sistema determinadas por los flujos de intercambio con el medio y que pueden ser anulados por una inversión de esos flujos. Pero los intercambios con el medio provocan otras transformaciones en el interior del sistema que *no son reversibles;* son las que entrañan una disminución del rendimiento en el ciclo de Carnot, es decir, flujos que una inversión del sentido de funcionamiento del ciclo no puede devolver a la fuente caliente. El término d_iS, que describe esas transformaciones, es siempre positivo o nulo; una inversión de los intercambios con el medio no cambia su signo. La variación de entropía dS es así la suma de dos términos, d_eS y D_iS, con propiedades diferentes; el primero es independiente de la dirección del tiempo, ya que su signo depende solamente del sentido de los intercambios con el medio; el segundo sólo puede hacer crecer la entropía en el curso del tiempo, o bien dejarla constante.

Notemos inmediatamente el carácter único de la descomposición de la variación de entropía. En el caso de la energía, E, la situación es radicalmente distinta. Ciertamente podríamos escribir que dE es igual a la suma de un término ligado a los intercambios y un término ligado a la producción interior; pero el principio de conservación de la energía expresa precisamente que no hay «producción» de energía, sino solamente una transferencia de un lugar a otro del espacio. La variación dE de la energía se reduce así a d_eE. Por otra parte, si pensamos en una magnitud no conservada, por ejemplo la cantidad de hidrógeno en un recipiente, esta cantidad puede variar a causa de una cesión de hidrógeno o de una producción de hidrógeno determinada por reacciones químicas dentro del recipiente. Pero, en este caso, el signo del término «producción» no viene dado de antemano. Podemos, según las circunstancias, producir o destruir hidrógeno. La característica única del segundo principio se centra en el hecho de que

el término de producción es *siempre positivo*. La producción de entropía traduce una evolución irreversible del sistema.

Hemos evocado varias veces el problema de las «pérdidas», en mecánica o en la ciencia de los motores térmicos. Y es que cuando la descripción física concede privilegios a las transformaciones naturales que pueden ser idealizadas como reversibles, sólo las «pérdidas», la separación entre lo ideal reversible y la transformación real que no lo es nunca del todo, subsisten para recordar, en el interior de la física, que la mayor parte de las evoluciones naturales son intrínsecamente irreversibles. La termodinámica de Clausius no da una significación especial sino es a las transformaciones reversibles. Se limita a afirmar, a propósito de la «producción de entropía», la existencia de la desigualdad $d_iS/dt \geqslant 0$. En apariencia, no se ha realizado ningún progreso, pero, de hecho, esta sola definición va a permitir ir más allá de la problemática de las pérdidas de rendimiento. Porque, si vamos del ciclo de Carnot a cualquier otro sistema termodinámico, *la distinción entre flujo y producción de entropía puede siempre realizarse*. En un sistema aislado, que no intercambia nada con el medio, el flujo de entropía es, por definición, nulo. Sólo subsiste el término de producción y la entropía del sistema no puede sino aumentar o permanecer constante. Aquí ya no es cuestión de transformaciones irreversibles en tanto que aproximaciones de transformaciones reversibles: el crecimiento de la entropía muestra una *evolución espontánea* del sistema. La entropía llega a ser así un «indicador de evolución» y traduce la existencia en física de una «flecha del tiempo»: para todo sistema aislado, el futuro está en la dirección en la cual la entropía aumenta.

Pero ¿qué sistema estaría mejor aislado que el Universo entero? Y qué importa que la evolución del Universo no pueda definirse de forma físicamente precisa, ya que, justamente, la termodinámica de Clausius no busca el definir los procesos irreversibles, sino solamente afirmar su existencia. En 1865, Clausius da su famoso enunciado cosmológico de los dos principios de la termodinámica:

> *«Die Energie der Welt ist konstant*
> *Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*

Aunque abandonemos el contexto cosmológico, el enunciado: *la entropía de un sistema aislado aumenta hasta un máximo* sobrepasa ampliamente el problema tecnológico planteado en el origen de la ter-

modinámica. El aumento de entropía ya no es sinónimo de pérdidas, se encuentra ligado a los *procesos naturales* que tienen asiento en el sistema y que lo llevan invariablemente hacia el equilibrio, estado en el cual la entropía es máxima y en donde ningún proceso productor de entropía puede producirse.

Se puede, retrospectivamente, medir la naturaleza del gesto con el cual Carnot fundó la termodinámica e hizo callar a los hornos; dándose «dos fuentes», separaba lo que en un motor es intrínsecamente irreversible, o sea el proceso de combustión productor del movimiento y lo que puede ser idealizado y convertido en transformaciones reversibles.

Las transformaciones reversibles pertenecen a la física clásica en el sentido en que definen la posibilidad de actuar sobre un sistema, de controlarlo. El objeto dinámico es controlable por medio de sus condiciones iniciales: una adecuada preparación del sistema conlleva la deseada evolución hacia tal o cual estado predeterminado. El objeto termodinámico, cuando está definido en función de sus transformaciones reversibles, es controlable a través de sus condiciones de contorno: un sistema en equilibrio termodinámico, del cual se varía *muy progresivamente* sea la temperatura, sea el volumen, sea la presión, pasa por una serie de estados de equilibrio y la inversión de la manipulación lleva, de forma ideal, a su devolución al estado inicial. El carácter reversible de la evolución y la sumisión al control a través de las condiciones de contorno son enteramente solidarios. Dentro de este marco, la irreversibilidad viene definida negativamente, aparece sólo como una evolución «incontrolada» que se produce cada vez que el sistema escapa al control. Pero se puede invertir este punto de vista: se puede ver en los procesos irreversibles que disminuyen el rendimiento, el último vestigio que pueda subsistir de la *actividad* espontánea e intrínseca de la materia en una situación en la que las manipulaciones la canalizan. La distancia entre el rendimiento ideal y el rendimiento real traduce de manera negativa una propiedad que distingue esencialmente los sistemas de la dinámica clásica de los de la termodinámica; el objeto termodinámico, *contrariamente al objeto dinámico*, está sólo parcialmente controlado; puede que llegue a «escapar» en una evolución espontánea, *porque, para él, todas las evoluciones no son iguales.*

La relación $dS = d_eS + d_iS$ significa, pues, que la evolución hacia el equilibrio es *de otra naturaleza* que la evolución determinada y controlada por una alteración de las condiciones de contorno (tal como

la temperatura ambiente). Para un sistema aislado, el equilibrio aparece como un verdadero atractor de los estados de no-equilibrio, y podemos generalizar nuestro primer enunciado diciendo que la evolución hacia un estado «atractor» es diferente de toda otra evolución y, particularmente, de la evolución de un estado atractor a otro estado atractor, cuando el sistema se ve forzado a evolucionar.

Max Planck subrayó claramente la diferencia entre estos modos de evolución natural y la singularidad de ciertos estados que esa diferencia revela. Parece ser, escribe Planck, que la naturaleza «privilegia» ciertos estados; el crecimiento irreversible de la entropía, d_iS/dt, describe la aproximación del sistema hacia un estado que lo «atrae», que prefiere y del cual no se apartará espontáneamente: aproximación irreversible. «Desde este punto de vista, no pueden existir procesos cuyo estado final sea un estado de menor atracción para la naturaleza que el estado inicial. Los cambios reversibles son un caso límite en los cuales la naturaleza tiene tanta propensión hacia el estado inicial como hacia el estado final; por eso el paso del uno al otro es posible en los dos sentidos» [21].

¡Cuán extraño es este lenguaje al de la dinámica! Allí, el sistema evoluciona sobre una trayectoria dada de una vez por todas, y guarda eterno recuerdo de su punto de partida (ya que las condiciones iniciales determinan de una vez por todas la trayectoria). Aquí, por el contrario, *todos* los sistemas en estado de no-equilibrio evolucionan hacia el *mismo* estado de equilibrio, habiendo *olvidado* el sistema sus condiciones iniciales, habiendo olvidado la forma en la que ha sido preparado. Sólo cuenta la «cuenca de atracción»: todos los sistemas que tienen un estado perteneciente a esta cuenca se dirigen hacia el mismo estado final, caracterizado por el mismo comportamiento, el mismo conjunto de propiedades. Así, el calor específico, o la compresibilidad de un sistema en equilibrio, son propiedades características independientes de la manera en la que hemos preparado el sistema. (Es, por otra parte, una feliz circunstancia que simplifia enormemente el estudio de los estados físicos de la materia, y que también, en el límite, lo hace posible. En efecto, para que podamos hablar de calor específico, de compresibilidad, hacen falta sistemas compuestos de un número inmenso de partículas [22]. Desde el punto de

[21] M. Planck, *Initiations à la physique*, París, Flammarion, 1941, pp. 18-19.

[22] Se introduce, en química-física, el número de Avogadro, o el número de moléculas de un «mol» de materia (todo «mol» contiene el mismo número de partículas:

vista dinámico está prácticamente excluido que un estado pueda ser reproducido, siendo infinita la variedad de estados y comportamientos dinámicos realizables en un sistema de 10^{23} partículas.)

Llegamos así a dos descripciones sustancialmente diferentes: la dinámica, aplicable al mundo de las masas en movimiento, y la termodinámica, base de la ciencia de lo complejo. Pero ante esta dualidad se plantea infaliblemente esta pregunta: ¿cómo articular esas descripciones? Es un problema que no ha cesado de discutirse desde la formulación de las leyes termodinámicas.

4. *El principio de orden de Boltzmann*

Como acabamos de ver, la oposición entre atractor y ley del movimiento abre el problema de la articulación entre las dos descripciones y el de la posibilidad de paso de la una a la otra [23].

A finales del siglo XIX, la contestación a esta última pregunta aparecía como negativa a la mayoría de los investigadores: los dos principios de la termodinámica constituían leyes nuevas, base de una nueva ciencia, que era imposible referir a la física tradicional. Había que aceptar la diversidad cualitativa de la energía y su tendencia a la degradación. Tal era, al menos, la tesis que los «energetistas» oponían a los «atomistas». En lo que a estos últimos se refiere, se negaban a renunciar a lo que consideraban ser la ambición misma de la física: reducir la complejidad de los fenómenos naturales a la simplicidad de los comportamientos elementales.

De hecho, la cuestión del paso entre los niveles microscópico y macroscópico iba a revelarse, lo veremos más adelante, de una extraordinaria fecundidad para todo el desarrollo de la física. Boltzmann fue el primero en afrontar este reto: pensaba que había que encontrar nuevos conceptos físicos para ampliar la física de las trayectorias a las situaciones descritas por la termodinámica. Esta innovación conceptual, Boltzmann, después de Maxwell, la fue a buscar en el concepto de probabilidad.

---

el número de átomos de hidrógeno en un gramo). Este número es del orden de 6×10^{23}, siendo éste el orden de magnitud característica del número de partículas que constituyen los sistemas regidos por las leyes de la termodinámica clásica.

[23] En *Le Retour éternel et la philosophie de la physique* (París, Flammarion, 1927), Abel Rey habla de todos los esfuerzos desplegados por los físicos del siglo XIX para escapar a una definición pragmática de la irreversibilidad (disipación de la energía utilizable), y concluye mostrando que Boltzmann resuelve el problema identificando la energía utilizable y (como veremos) estado improbable.

No era en sí una novedad el hecho de que la probabilidad intervenga como auxiliar en la descripción de un fenómeno complejo. Por otra parte, parece ser que Maxwell se inspiró en la obra de Quételet, quien inventó el «hombre medio» en sociología. La innovación consistía en introducir la probabilidad en física, y no a título de instrumento de aproximación, sino de principio explicativo, para mostrar qué comportamiento nuevo puede adoptar un sistema por el hecho de estar compuesto por una población numerosa.

Tomemos un simple ejemplo de aplicación del concepto de probabilidad en física. Una población de N partículas se encuentra en una caja dividida en dos compartimentos iguales. Se plantea la cuestión de conocer la probabilidad de las diversas distribuciones posibles de las partículas entre los compartimentos, es decir, la probabilidad de encontrar N_1 partículas en el primer compartimentos (y $N_2=N-N_1$ en el segundo).

El análisis combinatorio permite calcular el número de formas diferentes en las que podemos realizar un cierto reparto de N partículas. Así, si $N=8$, hay una sola forma de poner las ocho partículas dentro de una sola mitad; sin embargo, hay ya ocho maneras diferentes de poner una partícula en una sola mitad y las siete restantes en la otra; y un reparto por igual de las partículas entre las dos mitades puede realizarse de $8!/4!4!=70$ maneras diferentes [donde $n!=1 \cdot 2 \cdot 3 ... (n+1) \cdot n$]. De forma similar, sea cual fuere N, se puede definir un *número de complexiones*, P, que da el número de formas diferentes de realizar el reparto N_1, N_2; $P(N_1, N_2) = N!/N_1!N_2!$

Para una población dada, el número de complexiones es tanto más elevado cuanto menos es la diferencia entre N_1 y N_2; es máximo cuando hay una equipartición entre las dos mitades. Es de señalar que, cuanto mayor es N, más se ahonda la diferencia entre los números de complexiones correspondientes a los distintos modos de reparto. Para N del orden de 10^{23} de los sistemas macroscópicos, la mayoría aplastante de los repartos particulares posibles realizan el reparto $N_1=N_2=N/2$. Para los sistemas compuestos de un gran número de partículas, todo estado diferente de la equipartición puede así ser calificado de muy improbable.

Fue Boltzmann quien hizo notar por primera vez que se podía interpretar el crecimiento irreversible de la entropía como la expresión del crecimiento del desorden molecular, del olvido progresivo de toda disimetría inicial, porque toda disimetría es improbable respecto al es-

tado correspondiente al número máximo de complexiones. La idea de Boltzmann fue, pues, la de identificar la entropía con el número de complexiones: la entropía caracteriza a cada estado macroscópico por la medida del número de maneras diferentes de realizar este estado [24], $S=k \cdot lnP$. El factor de proporcionalidad k es una constante universal llamada constante de Boltzmann.

La importante fórmula de Boltzmann hace de la evolución termodinámica una evolución hacia estados de probabilidad creciente y, del estado atractor, el estado macroscópico realizado por la casi totalidad de los estados microscópicos en los cuales puede encontrarse el sistema. Estamos, evidentemente, muy lejos de Newton. Por primera vez, un concepto físico ha sido justificado en términos de probabilidad. Sin embargo, el status de esta explicación sigue siendo problemático, pero su fecundidad es, de entrada, manifiesta. La probabilidad basta para explicar el olvido de toda disimetría inicial, de toda repartición particular (por ejemplo, el conjunto de las partículas reunidas en una subregión del sistema, o bien la distribución de velocidades que resulta de la mezcla de dos gases a diferentes temperaturas). Este olvido proviene del hecho de que, *cualquiera que sea la evolución particular del sistema*, acabará por finalizar en uno de los estados microscópicos que corresponden al estado microscópico de máximo desorden y simetría; en efecto, la aplastante mayoría de los estados microscópicos posibles realizan este estado. Una vez en este estado, y por la misma razón, el sistema no se alejará de él más que por tiempos y distancias muy pequeños; no dejará de *fluctuar* alrededor del estado atractor.

El principio de orden de Boltzmann implica que el estado más probable accesible a un sistema es aquel en el cual los acontecimientos en masa que se producen simultáneamente en él *compensan estadísticamente* sus efectos. Recogiendo el ejemplo de partida, cualquiera que sea la repartición inicial, la evolución del sistema llevará a la equipartición $N_1=N_2$. Este estado pondrá término a la evolución macroscópica irreversible del sistema: cierto es que las partículas no dejarán de pasar de una mitad a la otra, pero, como pasarán en promedio en cada instante *tantas en una dirección como en la otra*, sus movimientos no implicarán sino *fluctuaciones*, inevitables y continuas,

[24] La relación logarítmica traduce el hecho de que la entropía es una magnitud aditiva ($S_{1+2} = S_1 + S_2$), siendo los números de complexiones multiplicativos ($P_{1+2} = P_1 \times P_2$).

pero pequeñas y encaminadas a una regresión rápida alrededor de $N_1 = N_2$. La interpretación probabilística de Boltzmann permite así comprender la singularidad de los estados atractores que estudia la termodinámica del equilibrio.

Acabamos de tratar el caso de un sistema aislado: no solamente el número de partículas, sino la energía total del sistema están fijados por las condiciones de contorno. El razonamiento de Boltzmann ha podido ser generalizado a los sistemas cerrados y abiertos que admiten un estado de equilibrio. En el caso de un sistema cerrado, que los intercambios térmicos con el medio ambiente mantienen a una temperatura T invariante, el equilibrio está definido no por el máximo de entropía, sino por el mínimo de una función análoga, la energía libre, $F=E-TS$, en donde E es la energía del sistema.

La estructura de esta fórmula traduce el hecho de que el equilibrio resulta aquí de una competición entre factores energéticos y entrópicos. Es la temperatura la que determina los pesos relativos de los dos factores: a baja temperatura, la energía es dominante; se formarán entonces *estructuras ordenadas* (entropía débil) y de *baja energía*, tales como los cristales; en el seno de estas estructuras cada átomo, cada molécula interacciona con sus vecinos y las energías cinéticas son lo bastante pequeñas para que esas fuerzas de interacción mantengan a las partículas prácticamente inmóviles. Por el contrario, a alta temperatura, es la entropía la que domina y, con ella, el desorden molecular. Llegamos así al estado líquido y después al gaseoso.

La entropía S para un sistema aislado, la energía libre F para un sistema a temperatura T fija, son ejemplos de «potenciales termodinámicos». El extremo de un potencial termodinámico define al estado atractor hacia el cual tiende todo sistema cuyas condiciones de contorno corresponden a la definición de ese potencial.

Subrayemos al fin que el principio de orden de Boltzmann permite así prever la formación de estructuras físicas *ordenadas* y descubrir la coexistencia de fases en el seno de un sistema de equilibrio: así, el equilibrio entre un producto cristalizado y ese mismo producto en disolución. Las estructuras del equilibrio constituyen, es importante precisarlo, estructuras definidas a escala molecular; son las interacciones entre moléculas, de un alcance del orden de 10^{-8} cms. (angström), las que estabilizan el edificio cristalino y le confieren sus propiedades macroscópicas. La dimensión del cristal no es, de hecho, propiedad intrínseca de la estructura, traduce solamente la cantidad de materia que, estando en equilibrio, pertenece a la fase cristalina.

La termodinámica del equilibrio aporta una contestación satisfactoria en lo que se refiere a un inmenso número de fenómenos físicos-químicos. Sin embargo, esta contestación es incompleta desde al menos dos puntos de vista.

En primer lugar, si se supone que el equilibrio constituye una noción estadística, que corresponde al estado de máxima probabilidad, supuestamente dadas las condiciones de contorno, queda por saber cómo justificar la introducción de la probabilidad misma, que es hasta ahora una noción extraña a la descripción dinámica y a sus trayectorias deterministas. Por otra parte, nos podemos preguntar, y este es el punto que vamos a estudiar aquí, si las estructuras de equilibrio bastan para interpretar los diversos fenómenos de estructuración que encontramos en la naturaleza. La contestación a esta pregunta es claramente negativa.

Las estructuras de equilibrio resultan de una compensación estadística de la actividad del tropel de constituyentes elementales. Están, pues, desprovistas de actividad macroscópica, son inertes a nivel global. En cierto sentido, son igualmente inmortales; una vez formadas pueden ser aisladas y mantenerse indefinidamente sin necesidad de ningún intercambio con el exterior. Así pues, si examinamos una célula o una ciudad, la misma constatación se impone: no es solamente que estos sistemas estén abiertos, sino que viven de este hecho, se nutren del flujo de materia y energía que les llega del mundo exterior. Queda excluido el que una ciudad o una célula viva evolucione hacia una compensación mutua, un equilibrio entre los flujos entrante y saliente. Si lo deseamos, podemos aislar un cristal, pero la ciudad y la célula, apartadas de su medio ambiente, mueren rápidamente; son parte integrante del medio que las nutre, constituyen una especie de encarnación, local y singular, de los flujos que no cesan de transformar.

Y no es solamente la naturaleza viva la que es fundamentalmente extraña a los modelos de la termodinámica del equilibrio. La hidrodinámica, la ciencia de los flujos y de las turbulencias, la meteorología, la ciencia de la organización inestable de masas de aire en función de los flujos de materia y de calor, describen la naturaleza inanimada como la sede de los flujos incesantes que la constituyen como activa y organizada.

No vemos cómo aplicar el principio de orden de Boltzmann a tales situaciones. Que un sistema se uniformice en el transcurso del tiempo, podemos comprenderlo en términos de complexiones en el

estado uniforme; cuando están olvidadas las «diferencias» creadas por las condiciones iniciales el número de complexiones será máximo. Pero si se produce un movimiento de convección espontáneo, será ciertamente imposible comprenderlo desde ese punto de vista, ya que la corriente de convección demanda una coherencia, una cooperación entre un número inmenso de moléculas, es un estado privilegiado al que sólo puede corresponder un número relativamente pequeño de complexiones. Y si la convección es un «milagro», será *a fortiori* lo mismo para la vida.

En el límite, podría invertirse la cuestión de la pertinencia de los modelos del equilibrio. Para poder obtener un sistema en equilibrio, es necesario protegerlo de los flujos que constituyen la naturaleza, es necesario «empaquetarlo» o embotellarlo, como el frágil y artificial homúnculo quien, en el *Fausto* de Goethe, dice al alquimista que lo ha creado: «Ven, abrázame con ternura en tu seno, pero no demasiado fuerte, por miedo a que el cristal estalle. Es la propiedad de las cosas: a lo que es natural, apenas le basta el Universo; lo que es artificial pide un espacio cerrado.» En el mundo que conocemos, el equilibrio es un estado raro y precario, la evolución hacia el equilibrio implica, de hecho, un mundo bastante alejado del sol, para que sea concebible el aislamiento parcial del equilibrio (no hay «caja» posible a la temperatura del sol), pero en donde el no-equilibrio sea la regla: un mundo «tibio».

Durante mucho tiempo, sin embargo, algunos físicos pensaron poder definir el orden inerte de los cristales como el único orden físico previsible y reproducible y la evolución hacia el desorden y la inercia como la única evolución deducible de las leyes fundamentales de la física. Desde entonces, las extrapolaciones intentadas a partir de las descripciones termodinámicas iban a definir como rara e imprevisible la evolución típica descrita por las ciencias biológicas, las ciencias de la sociedad y de la cultura: complejidad creciente, amplificación de innovaciones. ¿Cómo articular, por ejemplo, la evolución darwiniana, *selección* estadística de acontecimientos raros, con la *desaparición* estadística de toda particularidad, de toda configuración rara tal como lo describe Boltzmann? ¿Pueden simultáneamente tener razón Carnot y Darwin?, se pregunta con razón Roger Caillois [25].

La termodinámica del equilibrio constituye ciertamente la prime-

[25] R. Caillois, «La dissymétrie», en *Cohérences aventureuses*, París, Gallimard, colección Idées, 1973, p. 198.

ra respuesta dada por la física al problema de la complejidad de la naturaleza. Esta respuesta se enuncia como disipación de energía, olvido de las condiciones iniciales, evolución hacia el desorden. Cuando la dinámica, ciencia de las trayectorias eternas y reversibles, era indiferente a las preocupaciones del siglo XIX, la termodinámica del equilibrio se vio capaz de oponer al punto de vista de las otras ciencias su propia idea sobre el tiempo. Y ese punto de vista es el de la degradación y la muerte. Ya preguntaba Diderot: «¿Qué somos, seres sensibles y organizados en el mundo inerte y sumiso de la dinámica?» Desde hace un siglo, nuestra cultura está desgarrada por esta nueva pregunta: ¿qué significa la evolución de los seres vivos, de sus sociedades, de sus especies en el mundo del desorden creciente de la termodinámica? ¿Qué relación existe entre el tiempo termodinámico de aproximación al equilibrio y el tiempo del devenir complejo, este tiempo del cual Bergson decía que es una invención o nada de nada?

Capítulo V
LOS TRES ESTADIOS DE LA TERMODINAMICA

1. *Flujo y fuerza*

Volvamos[1] a la formulación del segundo principio dada en el capítulo anterior. La entropía juega un papel central en la descripción de la evolución. Como ya hemos visto, puede escribirse su variación como suma de dos términos: el término d_eS, conectado a los intercambios entre el sistema y el resto del mundo y un término de producción, d_iS, debido a fenómenos irreversibles dentro del sistema. Este término es siempre positivo excepto en el equilibrio termodinámico, en donde se hace nulo. Para sistemas aislados ($d_eS=0$), el estado de equilibrio corresponde a un estado de máxima entropía.

Con el fin de apreciar el significado físico del segundo principio, necesitamos una descripción más detallada de los diversos fenómenos irreversibles (difusión de calor, pero también difusión de mate-

[1] En lo que concierne a la teoría expuesta en éste y en el siguiente capítulo, véase Nicolis, G., y Prigogine, I., *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, Nueva York, Wiley-Interscience, 1977; Glansdorff, P., y Prigogine, I., *Structure, stabilité et Fluctuations*, París, Masson, 1971.

ria, reacciones químicas, etc.) que contribuyen a la producción de entropía $P=d_iS/dt$.

De especial interés para nosotros es la clase de proceso irreversible que constituyen las reacciones químicas. Los procesos químicos juegan un papel fundamental en biología. La célula viva presenta una actividad metabólica incesante. En ella tienen lugar simultáneamente millares de reacciones químicas que transforman la materia de la cual se alimenta, sintetizando los constituyentes y eliminando los productos de deshecho. En lo que respecta tanto a las velocidades de reacción como a los lugares de reacciones dentro de la célula, esta actividad química está sumamente coordinada. Así, la estructura biológica combina orden con actividad, en perfecto contraste con los estados de equilibrio que pueden estar coordinados, pero que son inertes. ¿Pueden los procesos químicos proporcionarnos la clave de la diferencia entre el comportamiento de un cristal y el de una célula?

Deberemos considerar las reacciones químicas desde un doble punto de vista, cinético y termodinámico.

Desde el punto de vista cinético, la magnitud fundamental es la *velocidad* de reacción. La teoría clásica de la cinética química se basa en la suposición de que la velocidad de reacción es proporcional a las concentraciones de los productos que toman parte en ella. Es en verdad a través de las colisiones entre moléculas como la reacción tiene lugar y es bastante natural suponer que el número de colisiones es proporcional al producto de las concentraciones de las moléculas reactantes.

Como ejemplo tomemos una reacción simple tal que $A+X \rightarrow B+Y$. Esta fórmula (la ecuación de reacción) quiere decir que siempre que una molécula del componente A se encuentra con una molécula de X hay una cierta probabilidad de que ocurra una reacción y de que se produzca una molécula de B y una molécula de Y. Una colisión que produce un cambio como el anterior en la naturaleza de las moléculas es una «colisión reactiva». Solamente una (generalmente muy pequeña) fracción (por ejemplo, $1/10^6$) de todas las colisiones son de la clase anterior. En la mayoría de los casos, las moléculas retienen su carácter original y simplemente intercambian energía.

La cinética química estudia los cambios de concentración de los diferentes productos que intervienen en la reacción. Esta cinética viene descrita por ecuaciones diferenciales, al igual que el movimiento lo está por las ecuaciones newtonianas. Sin embargo, en este caso no calculamos la aceleración, sino las velocidades de cambio de concen-

tración y estas velocidades se expresan en función de las concentraciones de los reactantes. La velocidad de cambio de concetración de X, dX/dt, es entonces proporcional al producto de las concentraciones de A y X en la solución, i.e. $dX/dt=-kA \cdot X$, en donde k es el factor de proporcionalidad relacionado con magnitudes como la temperatura y la presión y que proporciona la medida de la fracción de colisiones reactivas que tienen lugar y que llevan a la reacción $A+X \rightarrow Y+B$. Ya que, en el ejemplo anterior, siempre que una molécula de X desaparece también lo hace una molécula de A, formándose una molécula de Y y otra de B, las velocidades de cambio de concentración están relacionadas, i.e. $dX/dt=dA/dt=-dY/dt=dB/dt$.

Pero si la colisión entre una molécula de X y una de A puede dar lugar a una reacción química, también puede efectuar la reacción en sentido contrario una colisión entre una molécula de Y y otra de B. En consecuencia, interviene en el sistema una segunda reacción, $Y+B \rightarrow X+A$, aportando una variación suplementaria en la concentración de X, $dx/dt=k'YB$. La variación total de la concentración de un compuesto químico viene dada por el balance entre las dos reacciones. En nuestro ejemplo, $dX/dt\ (=-dY/dt=...)=-kAX+k'YB$.

Dejando evolucionar el sistema por sí solo, en presencia de reacciones químicas éste tiende hacia un estado de equilibrio químico. El equilibrio químico es, por consiguiente, un típico ejemplo de estado atractor: cualquiera que sea la composición química inicial del sistema, éste último alcanza espontáneamente el estado final anterior, cuyas concentraciones químicas vienen dadas por una ley que no depende de la naturaleza de los reactivos ni de parámetros termodinámicos como la temperatura y la presión. El equilibrio químico se alcanza cuando las reacciones directas e inversas se compensan estadísticamente de manera que las concentraciones ya no varían $(dX/dt=0)$. Lo cual implica que el cociente de las concentraciones de equilibrio viene dado por $AX/YB=k'/k=K$. Se conoce este resultado como la «ley de acción de masas» o ley de Guldberg y Waage, siendo K la «constante de equilibrio». El cociente entre concentraciones determinadas por la ley de acción de masas es al equilibrio químico lo que la uniformidad de temperaturas (en el caso de un sistema aislado) es al equilibrio térmico. En todos estos estados, la producción de entropía, determinada respectivamente por las transformaciones químicas y por la difusión de calor, se anula.

Antes de estudiar la descripción termodinámica de las reacciones químicas, consideremos otro aspecto de la descripción cinética. La ve-

locidad de las reacciones químicas viene afectada no solamente por las concentraciones de las moléculas reactantes y por los parámetros termodinámicos (e.g. presión, temperatura, etc.), sino que también puede verse afectada por la presencia en el sistema de sustancias químicas que modifican la velocidad de reacción sin sufrir ellas mismas cambio alguno en el proceso. Se conocen las sustancias de este tipo con el nombre de «catalizadores». Los catalizadores pueden, por ejemplo, modificar el valor de las constantes cinéticas *k* o *k'*, o incluso permitir al sistema seguir un nuevo «camino de reacción». En biología, este papel lo realizan unas proteínas específicas, los «enzimas». Estas macromoléculas tienen una configuración espacial tal que les permite modificar la velocidad de una reacción dada. A menudo son altamente específicas y afectan a una sola reacción. Un posible mecanismo para poner en juego el efecto catalítico de los enzimas es el de presentar un «lugar de reacción» al cual tienden a ligarse las moléculas participantes en la reacción, incrementando así la probabilidad de entrar en contacto y reaccionar.

Un tipo muy importante de catálisis, particularmente en biología, es aquel en el cual es necesaria la presencia de un producto para su propia síntesis. O, en otras palabras, para producir una molécula de X debemos tener un sistema que ya contiene X. Con mucha frecuencia, por ejemplo, la molécula X *activa* una enzima. Ligándose al enzima estabiliza aquella configuración particular en la cual el lugar de reacción se hace accesible. He aquí un esquema de reacción que describe este tipo de situación $A+2X \rightarrow 3X$. Se trata de un fenómeno de autocatálisis, que se puede simbolizar mediante un bucle de reacción:



Una característica importante de los sistemas que tienen tales «bucles de reacción» es la de que las ecuaciones cinéticas que describen los cambios que ocurren en estos sistemas son ecuaciones diferenciales *no-lineales*. Aplicando el método antes descrito, la ecuación cinética obtenida para la reacción $A+2X \rightarrow 3X$ es $dX/dt=kAX^2$, en donde la velocidad de variación de la concentración de X es proporcional al cuadrado de su concentración.

Otro fenómeno muy importante en biología es el de la catálisis

cruzada, e.g. $2X+Y \rightarrow 3X$, $B+X \rightarrow Y+D$, que puede representarse con el bucle de la figura 3.

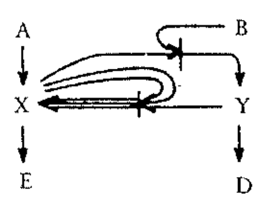


Figura 3. Este esquema da el conjunto de pasos de reacción del Bruselador descrito en la sección 5 de este capítulo.

Las propiedades matemáticas singulares de las ecuaciones diferenciales no-lineales que describen toda cinética química en la que existen reacciones «no-lineales», bucles de catálisis o de inhibición, son de vital importancia, como veremos más tarde, para la termodinámica de los procesos químicos muy alejados del equilibrio. Además, como hemos dicho, estos bucles de retroalimentación que permiten que un producto tenga un efecto «retroactivo» sobre la velocidad de la reacción de la que proviene, juegan un papel esencial en las funciones metabólicas, tal y como lo ha establecido la biología molecular.

Además de las velocidades de las reacciones químicas, debemos también considerar las velocidades de otros procesos irreversibles, como el transporte de calor, la difusión de materia, etc. Para designar la velocidad de un proceso irreversible se ha introducido el término de «flujo», simbolizado por la letra J. Al igual que la velocidad de reacción, los otros *flujos termodinámicos* son magnitudes *fenomenológicas,* no deducibles de una teoría general, sino resultantes del estudio particular de cada proceso irreversible. La termodinámica de los procesos irreversibles introduce una segunda magnitud: simultáneamente a las velocidades generalizadas, o flujos J, también utiliza las «fuerzas generalizadas», X, causantes de los flujos. Como veremos, flujo y fuerza permiten calcular la producción de entropía $P = d_iS/dt$. El ejemplo más simple es el de la conducción del calor. La ley de Fourier nos indica que el flujo de calor J es proporcional al gradiente de temperatura. Este gradiente de temperatura se identifica como la «fuerza» que determina el flujo de calor. Tanto las fuerzas como los flujos se anulan, por definición, en el equilibrio térmico.

Consideremos la definición de la fuerza generalizada que corresponde a una reacción química. Para ello, volvamos a la reacción $A+X\rightarrow Y+B$. Hemos visto cómo, en el equilibrio, el cociente entre las concentraciones viene dado por la ley de acción de masas. Como ya mostró Théophile De Donder, podemos introducir de manera general una «fuerza química», la *afinidad* que determina la dirección de la reacción química de la misma manera que el gradiente de temperatura determina la dirección en la cual fluye el calor. En el caso de la reacción que estamos considerando, la afinidad es proporcional a log $(K\ AX/BY)$, en donde K es la constante de equilibrio. Vemos inmediatamente que, en virtud de la ley de acción de masas, la afinidad se anula en el equilibrio. Su valor absoluto aumenta a medida que el sistema se aleja del equilibrio, es decir, se incrementa la diferencia entre el cociente entre concentraciones realizado en el sistema y el cociente determinado por la ley de acción de masas. La afinidad mide la distancia entre el sistema y el estado de equilibrio y su signo determina la dirección de las reacciones químicas susceptibles de llevar el sistema al equilibrio, hacia el estado «atractor».

La afinidad representa en el lenguaje moderno de los atractores —es decir, de las «preferencias» de la naturaleza, de sus tendencias invencibles, tal como las muestra la irreversibilidad— la antigua afinidad de los alquimistas, con la ayuda de la cual descifraban las relaciones selectivas entre los cuerpos químicos, los «amores» y los «odios» de las moléculas. La idea de que la actividad química no puede reducirse a trayectorias mecánicas, a la tranquila regulación de las leyes dinámicas, nunca fueron totalmente olvidados. Por ejemplo, Nietzsche afirmó que era ridículo hablar de «leyes químicas», como si los cuerpos químicos fuesen gobernados por leyes similares a las leyes morales. Afirmaba que en química no hay ligaduras y que cada cuerpo hace lo que le place. No es una cuestión de «respeto», sino una lucha de poder, de dominación sin piedad del débil por el fuerte [2].

La termodinámica, que hace del equilibrio químico, de afinidad nula, el ejemplo tipo de estado atractor, vuelve a tratar un viejo problema en el nuevo marco teórico de la ciencia del siglo XIX [3]. En

---

[2] F. Nietzsche, *Der Wille zur Macht*, *Sämtliche Werke*, Stuttgart, Kröner, 1964, aforismo 630.

[3] ¿Qué contenido preciso puede darse a la ley general de crecimiento de la entropía? ¿Cuáles son los procesos que, irreversiblemente, hacen aumentar la entropía? Para un físico teórico como De Donder, la actividad química de la materia parecía oscura

cuanto al hecho de la reacción química en sí mismo, constituye el ejemplo tipo de *proceso*, caracterizado por un «comienzo» y un «final», que escapa a las teorías de la física reversible. La mecánica cuántica puede definir las propiedades de estabilidad de las diferentes moléculas, pero no puede describir la dimensión irreversible del proceso durante el cual dos moléculas interaccionan y se transforman.

Ahora podemos formular una relación fundamental válida para todos los procesos irreversibles: la producción de entropía por unidad de tiempo, P, se escribe como una suma sobre todos los procesos irreversibles presentes en el sistema descrito y cada término de la suma es el flujo J, velocidad del proceso irreversible multiplicado por la fuerza X (afinidad, gradiente de temperatura, etc.), que engendra este proceso $P=d_iS/dt=\sum_n J_n X_n$. No podemos extendernos sobre la cuestión del campo de validez de esta ecuación fundamental. Señalemos brevemente que es el «campo macroscópico» en el que las fluctuaciones locales son lo suficientemente débiles para que el sistema pueda ser definido en cada una de sus regiones infinitesimales por un número limitado de magnitudes macroscópicas tales como la temperatura y la presión.

La producción de entropía permite distinguir tres amplios campos de la termodinámica, cuyo estudio corresponde a los tres estadios sucesivos en su desarrollo. La producción de entropía, los flujos y las fuerzas son todos nulos *en el equilibrio*; en la región *cercana al equilibrio*, en donde las fuerzas son débiles, el flujo es una función lineal de la fuerza, $J_k= \sum_n L_{kh}K_h$. El tercer campo de estudio se denomina región «no lineal», porque en ella el flujo es una función más complicada de la fuerza.

2. *Termodinámica lineal*

La primera relación general en la termodinámica del no-equilibrio fue descubierta para la región lineal, cercana al equilibrio, por On-

---

e inaccesible a la aproximación racional de la mecánica. La química, traída a escena en *Las afinidades electivas* de Goethe (del que De Donder era gran lector), a cuyas preguntas no habían contestado nunca los físicos teóricos, y el nuevo enigma de la irreversibilidad se unieron así en un desafío ya no ignorable. Véase también Prigogine, I., y Stengers, I., «Les deux cultures aujourd'hui», en *La Nouvelle Revue Française*, núm. 3126, pp. 42-54, 1979.

sager en 1931; son las famosas «relaciones de reciprocidad», las cuales afirman que, cuando un proceso irreversible k es influido por la fuerza termodinámica X_h, ($L_{kh} \neq 0$), el proceso irreversible h es influido también por la fuerza X_k ($L_{hk} \neq 0$). Además, ambos efectos se expresan mediante la misma magnitud, $L_{kh} = L_{hk}$. Así, la existencia de un gradiente térmico puede determinar un proceso de difusión de materia y la aparición de un gradiente de concentración en una mezcla inicialmente homogénea; simétricamente, un gradiente de concentración implica, con el mismo coeficiente de proporcionalidad, un flujo de calor a través del sistema.

Debemos insistir en el carácter *general* de las relaciones de Onsager. Poco importa, por ejemplo, que los fenómenos irreversibles se produzcan en un medio sólido, líquido o gaseoso. Las relaciones de reciprocidad son válidas independientemente de toda hipótesis microscópica; si L_{kh} es diferente de cero, lo mismo ocurrirá con L_{hk}, y ambas magnitudes son iguales.

La naturaleza general de las expresiones de reciprocidad fue el primer resultado que indicó que la termodinámica de los procesos irreversibles no era una mal definida *no man's land*, sino un tema de estudio cuya posible fertilidad podía ser comparable a la de la termodinámica del equilibrio. La termodinámica del equilibrio fue un logro del siglo XIX, la termodinámica del no-equilibrio lo es del siglo XX, siendo las relaciones de Onsager el punto crucial a partir del cual el interés se desplaza de la termodinámica del equilibrio hacia la termodinámica del no-equilibrio.

Existe otro resultado general en el campo de la termodinámica *lineal* fuera del equilibrio. Ya hemos hablado de los potenciales termodinámicos cuyos extremos corresponden a los estados de equilibrio hacia los cuales tiende irreversiblemente la evolución termodinámica. Hemos visto la entropía S para sistemas aislados y la energía libre F para sistemas cerrados a temperatura constante. También la termodinámica de sistemas cercanos al equilibrio introduce una función potencial. Es interesante constatar que este potencial es la *producción de entropía P*. El teorema de mínima producción de entropía demuestra de hecho que, en el rango de validez de las relaciones de Onsager, i.e. la región lineal, el sistema evoluciona hacia un estado estacionario caracterizado por un *mínimo* de producción de entropía compatible con las ligaduras impuestas al sistema. Estas ligaduras vienen determinadas por las condiciones de contorno. Pueden corresponder, por ejemplo, a dos puntos del sistema fijados a diferentes

temperaturas o a un flujo continuo de materia que alimenta la reacción y elimina sus productos. Un caso particularmente sencillo es aquel en el que las condiciones del entorno impone al sistema una fuerza termodinámica de valor constante, lo que hace que se mantengan a una determinada distancia del equilibrio.

El estado estacionario hacia el cual evoluciona el sistema es entonces un sistema caracterizado por las velocidades no-nulas de los procesos disipativos (es decir, irreversibles), pero estas velocidades se ajustan en función de la fuerza, de suerte que todas las magnitudes que definen globalmente el sistema se mantienen con valores independientes del tiempo. En particular, la entropía del sistema permanece constante, $dS=0$, lo cual implica que $d_eS=-d_iS<0$. El flujo de calor o de materia procedente de los alrededores determina una variación de la entropía d_eS negativa que compensa exactamente la variación de entropía d_iS debida a los procesos irreversibles.

En el estado estacionario, la actividad del sistema incrementa de forma continua la entropía del medio, pero con un valor mínimo compatible con las condiciones de contorno. En este contexto, el estado de equilibrio corresponde al estado estacionario particular accesible cuando las condiciones de contorno permiten una producción de entropía nula. En otras palabras, el teorema de producción mínima de entropía expresa una cierta «inercia» común a los sistemas que pueden alcanzar el equilibrio, y a los que se acercan al mismo tanto como las condiciones de contorno se lo permiten, desde el momento en que el estado hacia el que se dirigen pertenece también a la región lineal.

Por consiguiente, la termodinámica lineal describe el comportamiento estable predecible de sistemas que tienden hacia un mínimo nivel de actividad compatible con los flujos que los alimentan. El hecho de que la termodinámica lineal, al igual que la termodinámica del equilibrio, pueda describirse en función de un potencial, la producción de entropía, implica que en las evoluciones tanto hacia el equilibrio como hacia el estado estacionario el sistema se olvida de las condiciones iniciales: cualesquiera que sean las condiciones iniciales, el sistema alcanza finalmente aquel estado unívocamente determinado por las condiciones de contorno impuestas. Como resultado de ello, la reacción del sistema a cualquier cambio a las condiciones de contorno es enteramente predecible.

Por tanto, el papel desempeñado aquí por la actividad irreversible es básicamente el mismo que en el equilibrio. Y, aunque no se anula,

ello no impide, sin embargo, que el cambio irreversible sea una simple evolución hacia un estado que puede deducirse enteramente de leyes generales, identificarse con un «devenir-general» y no un «devenir-complejo» o «devenir-singular». En este sentido, la termodinámica lineal no permite superar la paradoja de la oposición entre Darwin y Carnot, entre la aparición de formas naturales organizadas, por una parte, y la tendencia física hacia la desorganización, por otra.

3. *Termodinámica no-lineal*

En la raíz del desarrollo de la termodinámica no-lineal hay una observación cuyo interés es de lo más sorprendente habida cuenta de que al principio pareció ser más un fracaso que otra cosa: a pesar de todos los esfuerzos parecía imposible encontrar una generalización del teorema de mínima producción de entropía para sistemas en los cuales los flujos ya no son funciones lineales de las fuerzas. Lejos del equilibrio, la producción de entropía continúa describiendo los diferentes regímenes termodinámicos, pero no permite ya definir un estado atractor, término estable de la evolución irreversible.

La ausencia de toda función potencial plantea un nuevo problema a la termodinámica: el de la estabilidad de los estados hacia los cuales un sistema es susceptible de evolucionar. En efecto, cuando el estado atractor es definido por un extremo determinado de un potencial, su estabilidad queda garantizada. Es verdad que toda fluctuación aleja al sistema de este estado, el cual corresponde siempre a la mínima producción de entropía y desde esa situación implica un incremento de dicha producción. Sin embargo, el segundo principio de la termodinámica impone el retorno del sistema hacia ese atractor. El sistema es, por consiguiente, «inmune» al desorden de la actividad elemental y a las desviaciones en relación con las leyes del entorno constantemente generadas por dicho desorden. Siempre que podamos definir un potencial, estamos describiendo un «mundo estable» en el que los sistemas siguen una evolución que los lleva a inmovilizarse definitivamente en una situación estática impuesta por el extremo correspondiente de la función potencial.

Cuando las fuerzas termodinámicas que actúan sobre el sistema alcanzan valores tales que sobrepasan la región lineal, ya no se puede garantizar la inmunidad de los estados estacionarios en relación con el desorden molecular. Hemos de estudiar cuidadosamente la posibi-

lidad de inestabilidades para cada uno de los estados, examinar el modo en que cada uno reacciona a los diferentes tipos de fluctuación que pueden perturbarlo. La estabilidad no es atributo de un estado como tal, sino el resultado de un examen que concluye en una regresión de todas las fluctuaciones posibles. Entonces, el sistema se dirá «inestable» si este análisis revela que ciertas fluctuaciones, en vez de amortiguarse, se amplifican e invaden todo el sistema, forzándole a evolucionar hacia un nuevo régimen que puede ser cualitativamente bastante diferente de los estados estacionarios que corresponden a un mínimo de producción de entropía.

De este modo, la termodinámica permite precisar qué sistemas son susceptibles de escapar al tipo de orden que gobierna el equilibrio y a partir de qué umbral, de qué distancia del equilibrio, de qué valor restrictivo impuesto, las fluctuaciones pueden llevar a un nuevo comportamiento completamente diferente del comportamiento habitual de los sistemas termodinámicos.

En el campo de la hidrodinámica, de desplazamiento de fluidos, estos fenómenos eran bien conocidos. Sabemos hace tiempo que, a partir de una determinada velocidad de flujo, aparece turbulencia en un fluido. Recientemente, Michel Serres [4] ha recordado que la ciencia antigua se preocupaba tanto por estas turbulencias que parece legítimo considerar la turbulencia como fuente de inspiración de la física lucreciana. Escribía Lucrecio que, algunas veces, en ciertos lugares y momentos, la eterna y universal caída de los átomos se ve perturbada por una muy pequeña desviación, el «clinamen». El consiguiente remolino da lugar al mundo, a la totalidad de las cosas naturales. El clinamen, esta desviación espontánea y no predecible, ha sido con frecuencia criticado como uno de los puntos flojos de la física de Lucrecio, por considerarse un artificio introducido *ad hoc*. Pero, ¿no es este conocimiento, por el contrario, una expresión del hecho de que el flujo laminar puede dejar de ser estable y transformarse *espontáneamente* en un flujo turbulento? Los expertos en hidrodinámica de hoy día someten a prueba la estabilidad de los fluidos, que idealizan como flujos continuos, introduciendo una perturbación que representa en la descripción teórica el efecto del desorden molecular.

La «inestabilidad de Bénard» es otro ejemplo chocante de la inestabilidad de un estado estacionario dando lugar a un fenómeno de au-

---

[4] *La Naissance de la physique dans le texte de Lucrèce*, op. cit.

toorganización espontánea. Se debe esta inestabilidad a un gradiente de temperatura vertical impuesto a una capa horizontal de líquido. La superficie inferior de este último se calienta a una cierta temperatura, temperatura más alta que la correspondiente a la superficie superior. Como consecuencia de estas condiciones de contorno, se genera un flujo de calor permanente de abajo a arriba. Cuando este gradiente impuesto alcanza un cierto valor crítico, el estado de reposo del fluido, i.e. el estado estacionario en el cual el calor se transporta por conducción sin convección alguna, se desestabiliza. Una convección que corresponde al movimiento coherente de un conjunto de moléculas se pone en marcha e incrementa la velocidad de transporte de calor. Por tanto, para valores dados de las ligaduras (i.e. el gradiente de temperatura), se incrementa la producción de entropía del sistema. La inestabilidad de Bénard es un fenómeno espectacular: el movimiento convectivo que se genera consiste en realidad en una compleja organización espacial del sistema; billones de moléculas se mueven coherentemente, formando células de convección hexagonales de un tamaño característico. El cálculo del número de complexiones de Boltzmann, que permite calcular la probabilidad de cada tipo de distribución macroscópica de la materia, puede aplicarse en este caso. Estudiamos la manera en que se distribuyen entre las moléculas los diferentes valores de velocidad. Así, el número de complexiones que se puede calcular, permite llegar a la conclusión de una probabilidad casi nula de que ocurra semejante fenómeno de auto-organización. Cada vez que aparecen nuevos tipos de comportamiento más allá del umbral de inestabilidad, se hace imposible aplicar el concepto de probabilidad basado en el cálculo del número de complexiones. Esto es especialmente obvio en lo que concierne a la *génesis* del nuevo comportamiento. En el caso de la inestabilidad de Bénard, es una *fluctuación*, una corriente de convección microscópica, que hubiera debido amortiguarse aplicando el principio de orden de Boltzmann, la que se amplifica hasta que invade todo el sistema. Más allá del valor crítico del gradiente impuesto aparece espontáneamente un nuevo orden molecular, que corresponde a una fluctuación gigante estabilizada a través de intercambios de energía con el mundo exterior por el gradiente que no cesa de alimentarla.

Bajo condiciones muy alejadas del equilibrio, el concepto de probabilidad intrínseco al principio de orden de Boltzmann deja de ser válido y, al mismo tiempo, la tendencia hacia la nivelación y el olvido de las condiciones iniciales deja de ser una propiedad general. En

particular, en un sistema que está globalmente evolucionando hacia el equilibrio (lo cual, por ejemplo, es cierto para el sistema planetario considerado como un todo) los procesos irreversibles pueden, de forma predecible, crear las condiciones para una autoorganización local. En este contexto, un fenómeno como el de la aparición de formas de vida puede ser considerado igual de predecible desde el punto de vista de la teoría física. Es ciertamente verdad que la vida es incompatible con el principio de orden de Boltzmann, pero no con el comportamiento que pueda aparecer en condiciones muy alejadas del equilibrio. Las células de Bénard constituyen un primer tipo de *estructura disipativa*, cuyo nombre representa la asociación entre la idea de orden y la de desperdicio y se escogió a propósito para expresar un nuevo hecho fundamental: la disipación de energía y de materia —generalmente asociada a los conceptos de pérdida y rendimiento y evolución hacia el desorden— se convierte, lejos del equilibrio, en fuente de orden; la disipación se encuentra en el origen de lo que podemos llamar los nuevos estados de la materia.

Las estructuras disipativas corresponden en realidad a una forma de organización *supramolecular*. Mientras que los parámetros que describen la estructura cristalina pueden deducirse de las propiedades de las moléculas de las cuales se compone y, en particular, a partir del rango de sus fuerzas de atracción y repulsión, las células de Bénard, al igual que todas las estructuras disipativas, son esencialmente un reflejo de la situación global de no-equilibrio que las produce. Los parámetros que las describen son macroscópicos; no son del orden de 10^{-8} cm, al igual que la distancia entre las moléculas de un cristal, sino del orden de centímetros.

Volvamos al caso de las reacciones químicas. Las reacciones químicas plantean un problema diferente al de la estabilidad hidrodinámica, a causa del *carácter específico* del conjunto de reacciones necesarias para provocar inestabilidades.

Todos los flujos se hacen turbulentos a una distancia lo «suficientemente» grande del equilibrio (el umbral se mide por números adimensionales como el número de Reynolds) y, sin embargo, esto no es cierto para las reacciones químicas. El estar muy alejados del equilibrio no es más que una condición necesaria, pero no suficiente. Para la mayoría de los sistemas químicos, cualquiera que sean las restricciones impuestas y la velocidad de los cambios químicos producidos, *el estado estacionario permanece estable* y las fluctuaciones arbitrarias se ven amortiguadas como en el caso del rango muy cercano al

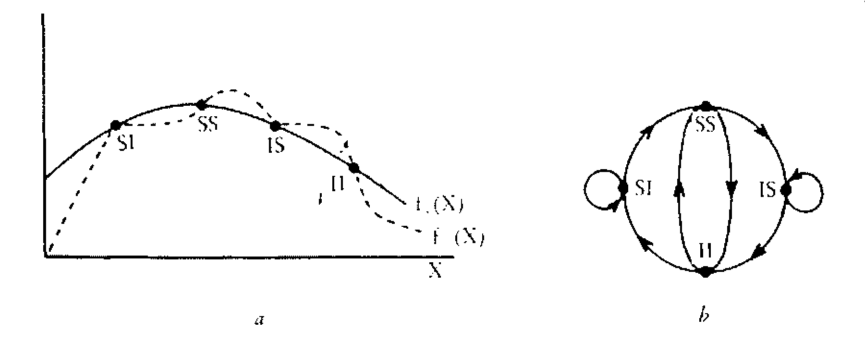


Figura 4. Los puntos de reacción a raíz de los cuales un producto modifica, directa o indirectamente, las condiciones de su propia síntesis, corresponden a términos *no-lineales* en las ecuaciones cinéticas que definen el conjunto de reacciones: una contribución al menos de dX/dt es un término en donde X posee una potencia mayor que uno. Es fácil ver la relación entre presencia de términos no-lineales y la posible inestabilidad de un estado estacionario recurriendo, en el caso de un problema con una sola variable, a un análisis cualitativo. Sea $dX/dt= f(X)$. Es posible descomponer $f(X)$ en dos funciones que definimos como *positivas o nulas* $f_+(X)$ y $f_-(X)$, tales que $f(X)=f_+(X)-f_-(X)$. En esta representación, los estados estacionarios corresponden a valores de X tales que $f_+(X)=f_-(X)$. Corresponden gráficamente a la intersección entre las curvas que representan estas dos funciones (*figura 4, a*). En el caso en el que dX/dt es una ecuación diferencial lineal, evidentemente sólo existe una intersección ($f_+(X)$ y $f_-(X)$ son rectas). En otros casos, la naturaleza de la intersección permite predecir la estabilidad del estado estacionario. Son posibles cuatro casos distintos, todos ellos represenatdos en la figura 4, a: el estado puede ser estable con respecto a fluctuaciones δX negativas, e inestable con respecto a las positivas *(SI)*; puede ser estable con respecto a cualquier fluctuación *(SS)*, estable sólo con respecto a fluctuaciones negativas *(IS)* e inestable con respecto a cualquier fluctuación *(II)*. Por ejemplo, en el caso *II*,

si $\delta X>0$, $f_+(X+\delta X>f_-(X+\delta X)$ y $dX/dt>0$
si $\delta X<0$, $f_+(X+\delta X<f_-(X+\delta X)$ y $dX/dt<0$

Cualquiera que sea la complejidad de las curvas $f_+(X)$ y $f_-(X)$, se constatará que la serie de los tipos de estados estacionarios se sujeta a condiciones estrictas. La figura 4, b, explora las posibilidades de sucesión de una cadena de este tipo ordenada para dos valores crecientes de X en la misma línea que enunciaron Poincaré y Lyapunov.

equilibrio. En particular, esto es cierto en sistemas en los cuales tenemos una cadena de transformaciones del tipo $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$... que vienen descritas por ecuaciones diferenciales *lineales*.

Tanto el destino de las fluctuaciones que perturban un sistema químico, como el tipo de nuevas situaciones hacia las cuales evolucionan, dependen de los mecanismos detallados de las reacciones químicas. En el equilibrio, y cerca del equilibrio las leyes termodinámi-

cas, eran generales; los estados de equilibrio y los estados estacionarios sólo dependían de la relación entre las diferentes velocidades de reacción. En contraste con las situaciones cercanas al equilibrio, el comportamiento de un sistema muy alejado del equilibrio se hace altamente específico, depende de manera crítica del mecanismo de las transformaciones químicas. Ya no hay una ley universalmente válida a partir de la cual el comportamiento global del sistema pueda deducirse. Cada sistema es un caso aparte, cada conjunto de reacciones químicas debe ser investigado y puede muy bien producir un comportamiento cualitativamente diferente.

Sin embargo, se ha obtenido un resultado general, a saber, una condición necesaria para la inestabilidad química: en una cadena de reacciones químicas que se desarrollan en un sistema, *los únicos pasos de reacción* que, bajo ciertas condiciones y circunstancias, pueden poner en peligro la estabilidad del estado estacionario son precisamente los «bucles catalíticos», i.e. pasos en los cuales un producto de una reacción química participa en su propia síntesis (figura 4).

4. *El encuentro con la biología molecular*

El desarrollo de la termodinámica de los procesos irreversibles se encuentra aquí con el de la biología molecular. Mientras que las reacciones «no-lineales», cuyo efecto (i.e. la presencia del producto de reacción) tiene una acción retroactiva sobre la causa, son comparativamente raras en el mundo inorgánico, la biología molecular ha descubierto que son prácticamente la regla en los sistemas vivos. La autocatálisis (i.e. la presencia de X acelera su propia síntesis), la autoinhibición (i.e. la presencia de X bloquea la catálisis necesaria para su síntesis), la catálisis cruzada (i.e. dos productos pertenecientes a distintas cadenas de reacción activan la síntesis el uno del otro) proporcionan los mecanismos de regulación clásicos que garantizan la coherencia de las funciones metabólicas.

Una descripción de la red de activaciones e inhibiciones metabólicas es un paso esencial para la comprensión de la lógica funcional de los sistemas biológicos. Esto incluye la iniciación de la síntesis en el momento en que son necesarias y el bloqueo de aquellas reacciones químicas cuyos productos se acumulan inutilizados en la célula.

El mecanismo básico a través del cual la biología molecular ex-

plica la transmisión y explotación de la información genética es en sí mismo un bucle de retroalimentación, un mecanismo «no-lineal». El ácido desoxirribonucleico, ADN, que contiene en forma secuencial toda la información requerida para la síntesis de las proteínas necesarias en la construcción y funcionamiento de la célula, interviene en una secuencia de reacciones en donde esta información se *traduce* en forma de diferentes secuencias proteínicas. De entre las proteínas sintetizadas algunos enzimas ejercen una acción de retroalimentación por la cual no sólo se activan y controlan las distintas etapas de la traducción, sino también el mecanismo de autorreplicación del ADN, a través del cual se copia la información genética a medida que las células se multiplican.

Tenemos, pues, una notable convergencia entre las dos ciencias que, aunque de desarrollos separados, han producido los conceptos requeridos para integrar los seres vivos en el mundo descrito por la física y la química.

Desde el punto de vista de la física, se trata de una exploración de lo «complejo», de situaciones muy alejadas del ideal, que podemos definir en función de los conceptos fundamentales de la física clásica o de la cuántica. Por el contrario, desde el punto de vista de la biología, se trata de un avance hacia lo simple, lo molecular. Más exactamente, por una parte la termodinámica descubrió la posibilidad de que existieran estructuras complejas y organizadas lejos del equilibrio y llegaba a la conclusión de la singularidad de estos nuevos estados de la materia, de la necesidad absoluta de conocer detalladamente los mecanismos químicos de un sistema para descubrir los nuevos comportamientos susceptibles de aparecer lejos del equilibrio. Por otra parte la biología molecular reducía las estructuras vivas a sus componentes y exploraba la diversidad de los mecanismos químicos, el entramado de las cadenas de reacción metabólicas, la lógica sutil y compleja del control, activación e inhibición de la función catalítica de las enzimas asociadas a las etapas críticas de cada una de las cadenas metabólicas. De esta forma la biología molecular descubre la omnipresencia en el metabolismo de las reacciones en bucle, los mecanismos de autocatálisis, de auto-inhibición, de todas las reacciones no-lineales que proporcionan la posibilidad de inestabilidad química lejos del equilibrio.

En primer lugar consideremos la glicolisis, i.e. la cadena de reacciones metabólicas en donde se degrada glucosa sintetizándose una sustancia energéticamente rica, el ATP (adenosín trifosfato), que pro-

porciona una fuente esencial de energía común a todos los seres vivos.

Por cada molécula de glucosa degradada se forman dos enlaces de fosfato, ricos en energía (que serán destruidos en caso de necesidad de energía): dos moléculas de ADP (adenosín difosfato) se transforman en dos moléculas de ATP. El estudio de la glicólisis constituye un buen ejemplo de cómo pueden ser complementarias la aproximación analítica de la biología y la investigación de la estabilidad que realiza la termodinámica [5].

Las investigaciones bioquímicas han demostrado la existencia de oscilaciones temporales en las concentraciones metabólicas y la responsabilidad de la glicólisis en la producción de este comportamiento periódico. Aún más exactamente, se probó que las oscilaciones eran debidas a una etapa clave en la secuencia de la reacción, una etapa activada por una enzima, la fosfo-fructoquinasa. Esta enzima es activada por el ADP e inhibida por el ATP. Este es un fenómeno no-lineal típico, perfectamente adaptado a las exigencias de un funcionamiento metabólico eficaz. Así es, cada vez que la célula emplea sus reservas energéticas, utiliza los enlaces fosfato y convierte ATP en ADP. Por consiguiente, la acumulación de ADP en la célula entraña un consumo intenso de energía y la necesidad de reconstituir las reservas. Por otra parte, la acumulación de ATP significa una reducción en la degradación de glucosa.

Las investigaciones teóricas de este proceso han mostrado que este mecanismo es susceptible de generar un fenómeno oscilatorio, un reloj químico. Los valores teóricos de las concentraciones químicas necesarias para producir oscilaciones y el consiguiente período de éstas reproducen bastante bien los valores experimentales. Las oscilaciones glicolíticas producen una modulación de todos los procesos energéticos de la célula y, por consiguiente, de manera indirecta, de otras muchas cadenas metabólicas.

Se trata de una regulación propiamente macroscópica, posible gracias a las regulaciones microscópicas, pero cualitativamente nueva respecto a ellas: lo global, como tal, no es directamente deducible de sus partes analíticas. Sin embargo, contrariamente a la mayoría de las doctrinas de emergencia que, como nosotros, subrayan la novedad

[5] A. Goldbeter y G. Nicolis, «An Allosteric Model with Positive Feedback Applied to Glycolytic Oscillations», en *Progress in Theoretical Biology*, vol. 4, 1976, pp. 65-160, y A. Goldbeter y S. R. Caplan, «Oscillatory Enzymes», en *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, vol. 5, 1976, pp. 449-473.

cualitativa del todo con relación a las partes, esta emergencia de un comportamiento supramolecular no trasciende los métodos de la ciencia cuantitativa.

Consideremos otros procesos biológicos que también han sido estudiados desde un punto de vista de estabilidad, en particular la activación e inhibición de los mecanismos de transporte activo a través de las membranas y la agregación de las amebas del moho del limo *(Dictyostelium discoideum)*.

Este proceso [6] es un caso interesante en la frontera entre la biología de los organismos unicelulares y la de los pluricelulares. Cuando el entorno en el cual viven y se multiplican estas amebas se empobrece en nutrientes, realizan una transformación espectacular. Se reúnen, a partir de una población de células aisladas, para formar un agregado de decenas de miles de células. Entonces, este «pseudoplasmodio» inicia un proceso de diferenciación, cambiando totalmente de forma. Se forma un pie, consistente, en aproximadamente, un tercio de las células, que contiene celulosa en abundancia. Este pie soporta una masa redondeada de esporas que se despegará y desplegará, multiplicándose las esporas en cuanto entran en contacto con un medio nutritivo adecuado, formando así una nueva colonia de amebas. Es este un ejemplo altamente espectacular de adaptación al medio, i.e. el nomadismo de una población que vive en una región hasta que ha agotado todos los recursos, seguido de una metamorfosis, gracias a la cual adquiere la movilidad necesaria para invadir otros entornos.

Una investigación de los primeros estadios del proceso de agregación revela que éste se inicia con la aparición de ondas de desplazamiento en la población de amebas, de un movimiento pulsante de convergencia de las amebas hacia el «centro de atracción», que parece formarse espontáneamente. La investigación experimental y una posterior modelización han mostrado que esta migración es una respuesta por parte de las células a la existencia en el entorno de un gradiente de concentración de una sustancia clave, el AMP cíclico, el cual es producido periódicamente por el centro atractor y posteriormente también por otras células a través de un mecanismo de relevo.

El ejemplo anterior es un típico ejemplo de lo que se puede de-

---

[6] A. Goldbeter y L. A. Segel, «Unified Mechanism for Relay and Oscillation of Cyclic AMP in Dictyostelium Discoideum», en *Proceedings of the National Academy of Science USA*, vol. 74, 1977, pp. 1543-1547.

nominar «orden a través de fluctuaciones»; la formación del centro atractor difundiendo AMP es indicativo de que el régimen metabólico correspondiente a un medio nutriente normal se ha hecho inestable, i.e. el medio nutritivo se ha agotado. El hecho que, en condiciones de escasez de alimentos, cualquier ameba puede ser la primera en emitir el AMP cíclico y convertirse en un atractor corresponde al comportamiento aleatorio de las fluctuaciones. Esta fluctuación es consiguientemente amplificda y organiza el medio.

5. *Más allá del umbral de inestabilidad química*

Si bien los fenómenos biológicos parecen hoy el campo privilegiado para el estudio experimental de las estructuras disipativas, es el análisis numérico del comportamiento de modelos cinéticos teóricos, mucho más simples que el más simple de los circuitos metabólicos, el que ha permitido poner en evidencia la impresionante variedad de los fenómenos de organización.

Uno de estos modelos ha sido estudiado particularmente en Bruselas y ha recibido de un grupo americano el sobrenombre, hoy día utilizado en la literatura científica, de «Bruselador».

Ya hemos establecido las etapas del Bruselador responsables de la inestabilidad. El producto X, sintetizado a partir de A y descompuesto para dar E, está conectado por una relación de catálisis cruzada con el producto Y; X es producido a partir de Y a través de un paso trimolecular, siendo Y sintetizado gracias a una reacción entre X y un producto B. La secuencia global de reacción del Bruselador puede presentarse con el diagrama de la figura 3.

En este modelo, las concentraciones de los productos A, B, D, E son parámetros dados (las llamadas «sustancias de control»). El comportamiento de este sistema se explora para valores en aumento de B, permaneciendo A constante. El estado estacionario hacia el cual este sistema puede evolucionar, i.e. el estado para el cual $dX/dt=dY/dt=0$, corresponde a las concentraciones $X_0=A$ y $Y_0=B/A$. Sin embargo, este estado estacionario deja de ser estable tan pronto como la concentración de B excede de un umbral crítico (permaneciendo constante todo lo demás). Después de que el umbral crítico ha sido alcanzado, el estado estacionario se transforma en un «foco» inestable y el sistema abandona este foco para alcanzar un «ciclo límite» (figura 5). En lugar de permanecer estacionarias las con-

centraciones de X e Y empiezan a oscilar con un período bien definido. El período de oscilación depende tanto de las constantes cinéticas que caracterizan las velocidades de reacción como de las condiciones de contorno impuestas al sistema como un todo (e.g. temperatura, concentración de A, B, etc.).

El comportamiento periódico adoptado por el sistema es estable. Más allá del umbral crítico, *el sistema abandona espontáneamente* el estado estacionario por amplificación de una fluctuación. Adicionalmente, cualesquiera que sean las condiciones iniciales, el sistema se va acercando al ciclo. No hay fluctuación capaz de hacer que el sistema eluda lo que es un verdadero *reloj químico.*

Cuando el análisis del Bruselador toma en cuenta el efecto de la difusión de los constituyentes a través del medio, descubrimos la impresionante variedad de comportamientos accesibles a este sistema, sin embargo, muy simple.

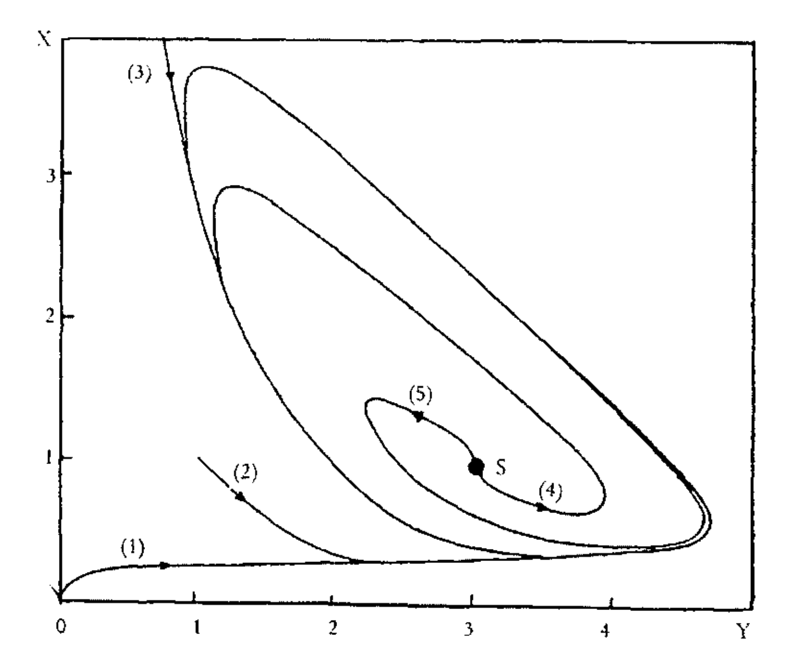


Figura 5. Ciclo límite: el foco del ciclo es el estado estacionario que es inestable para B mayor que $1+A^2$. Toda trayectoria (se han representado cinco), cualesquiera que sea su estado inicial, lleva al ciclo.

De hecho, mientras que en el equilibrio y cerca del equilibrio el sistema permanece espacialmente homogéneo, la difusión de las especies químicas a través del sistema induce, en la región muy alejada del equilibrio, la posibilidad de nuevos tipos de inestabilidad, incluyendo la amplificación de fluctuaciones que rompen la simetría espacial inicial. Las oscilaciones en el tiempo dejan entonces de ser las únicas estructuras disipativas al alcance del sistema. Lejos de ello; por ejemplo, pueden aparecer oscilaciones que son dependientes tanto del tiempo como del espacio. Corresponden a ondas químicas de las concentraciones de X e Y atravesando periódicamente el sistema (figura 6). Además de esto, especialmente cuando los valores de las constantes de difusión de X e Y son bastante diferentes una de otra, el sistema puede mostrar un comportamiento ya no periódico, sino estacionario, pero en donde aparece una estructuración espacial.

El número de estructuras disipativas diferentes compatibles con un conjunto dado de condiciones de contorno puede ser incrementado aún más cuando, en lugar de investigar el problema en una sola dimensión, lo estudiamos en dos o tres dimensiones. En un espacio circular bidimensional, por ejemplo, el estado estacionario espacialmente estructurado puede caracterizarse por la aparición de un eje privilegiado (figura 7). Esto corresponde a un nuevo y extremadamente interesante proceso de ruptura de simetría, especialmente cuando se recuerda que uno de los primeros pasos de la morfogénesis de un embrión es la formación de un gradiente en el sistema.

Hemos supuesto hasta ahora que las «sustancias de control» *(A, B, D, E)* están uniformemente distribuidas a lo largo y ancho del sistema de reacción. Si abandonamos esta simplificación pueden aparecer nuevos fenómenos como, por ejemplo, el que el sistema tome un «tamaño natural» que depende de los parámetros que describen el sistema. De esta manera el sistema determina su propio tamaño intrínseco, i.e. determina la región en la que está espacialmente estructurado o atravesado por ondas periódicas de concentración.

Estos resultados no dan más que una imgen muy incompleta de la gran variedad de fenómenos que pueden ocurrir muy lejos del equilibrio.

El interés suscitado por estas conclusiones proviene de que, al mismo tiempo que las investigaciones efectuadas sobre modelos teóricos, tales fenómenos han sido observados sobre ejemplos no sólo biológicos, sino también inorgánicos.

El ejemplo más conocido es, sin duda, la reacción descubierta por

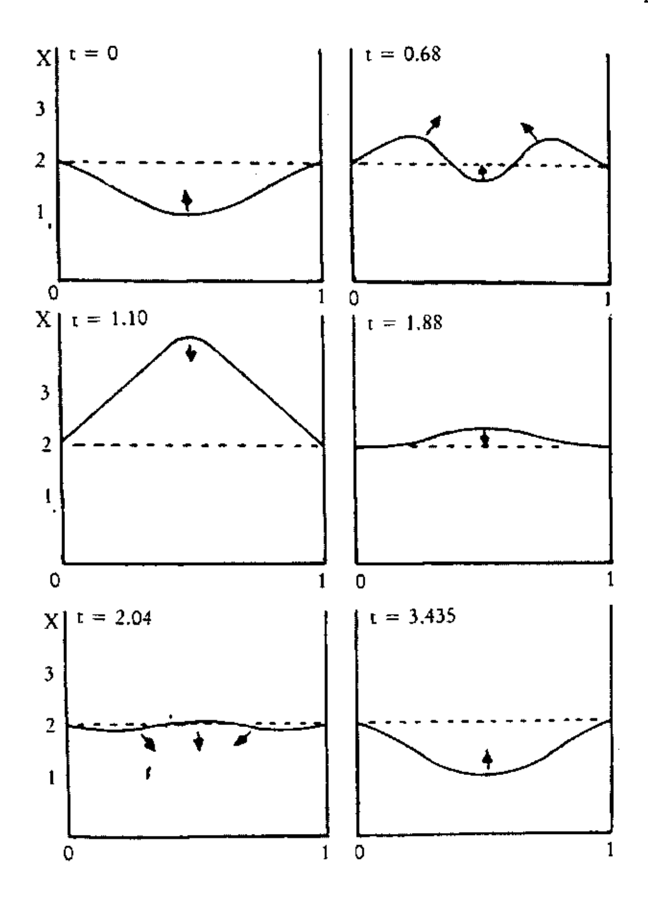


Figura 6. Onda química simulada en un ordenador con parámetros adimensionales $D_X = 8 \cdot 10^{-3}$, $A=2$, $B=5 \cdot 45$ (D_X y D_Y son coeficientes de difusión de X e Y).

Belousov (1958) y estudiada a continuación por Zhabotinsky [7]. Consiste en la oxidación de un ácido orgánico, como por ejemplo el ácido malónico, por un bromato potásico en presencia de un catalizador apropiado, el cerio, el manganeso o la ferroína. Pueden montarse diferentes condiciones experimentales en un mismo sistema, obte-

[7] Véase, por ejemplo, A. Winfree, «Rotating Chemical Reactions», en *Scientific American*, vol. 230, 1974, pp. 82-95.

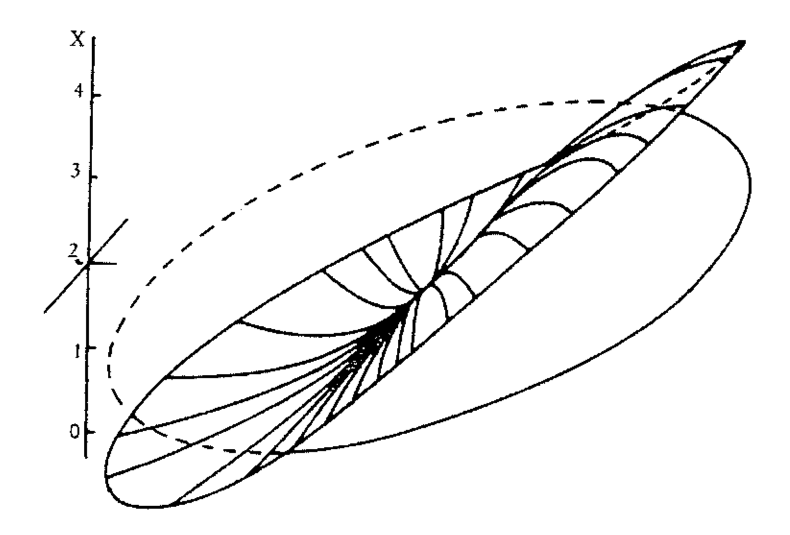


Figura 7. Estado estacionario con eje privilegiado obtenido por simulación en el ordenador con parámetros adimensionales $D_X=3 \cdot 25x\ 10^{-3}$, $D_Y=1 \cdot 62x\ 10^{-2}$, $A=2$, $B=4.6$ y $R=0.1$.

niéndose un reloj químico, una diferenciación espacial estable o la formación de frentes de onda de actividad química sobre distancias macroscópicas a través del medio reactivo.

6. *Historia y bifurcaciones*

Lejos del equilibrio, la homogeneidad del tiempo es destruida doblemente: por una parte, es destruida por la estructura espacio-temporal activa que confiere al sistema el comportamiento de un todo organizado, caracterizado por dimensiones y ritmo intrínsecos, pero también por la *historia* que implica la aparición de tales estructuras.

En el caso del modelo del Bruselador sin difusión, esta historia queda reducida a una simple fatalidad: una vez que el sistema se ha vuelto estable, en un momento u otro se producirá una fluctuación cuya amplificación desembocará en el ciclo límite. Pero en cuanto las ecuaciones toman en cuenta la difusión, la variedad de estados estables posibles más allá del umbral crítico, de los que hemos mencio-

nado algunos tipos, introduce un elemento aleatorio. Si a partir de una determinada distancia del equilibrio se abren al sistema no una, sino varias posibilidades, ¿hacia qué estado evolucionará éste? Ello dependerá de la naturaleza de la fluctuación que acabará por desestabilizar el sistema inestable y se amplificará hasta alcanzar uno de los estados macroscópicos posibles. Podemos hablar de una «elección» por parte del sistema, no causada por una libertad «subjetiva» cualquiera, sino porque la fluctuación es precisamente lo que, de la actividad intrínseca del sistema, escapa irreductiblemente al control que ejercen las condiciones de contorno; lo que traduce la diferencia de escala entre el sistema como un «todo» sobre el que podemos actuar y al que podemos definir y los procesos elementales cuyo desorden constituye la actividad de ese todo.

Llamamos bifurcación al punto crítico a partir del cual se hace posible un nuevo estado. Los puntos de inestabilidad alrededor de los cuales una perturbación infinitesimal es suficiente para determinar el régimen de funcionamiento macroscópico de un sistema, son puntos de bifurcación. Estos son los puntos cuyo papel ya enfatizaba Maxwell cuando meditaba sobre la relación entre, por una parte, el determinismo y los conceptos de selección y decisión, por otra (capítulo II, 3).

Un sistema tan simple como el Bruselador comporta ya una serie de puntos de bifurcación, definidos por lo que se llama un diagrama de bifurcaciones (figura 8).

El diagrama de bifurcaciones se despliega por valores crecientes de un parámetro, en este caso la concentración de *B*. En la primera bifurcación no se garantiza la estabilidad del estado estacionario. Si nos alejamos del equilibrio, son posibles otras estructuras y la primera puede hacerse inestable; el sistema, en la hipótesis de que se viera obligado por las condiciones de su entorno a alejarse cada vez más del equilirbio, se desarrollará por una sucesión de inestabilidades y fluctuaciones amplificadas. De esta forma, recorrerá el diagrama de bifurcaciones siguiendo un camino, lo que constituye, propiamente hablando, una *historia:* el determinismo de las ecuaciones que permiten calcular la estabilidad e inestabilidad de los diferentes estados y el azar de las fluctuaciones que deciden hacia qué estado se dirigirá efectivamente el sistema, están aquí asociados inseparablemente.

Acabamos de recorrer un diagrama de bifurcaciones tomando como parámetro la concentración de *B*. Otro parámetro de bifurcación es la *dimensión* del sistema. Evidentemente, esto es muy suges-

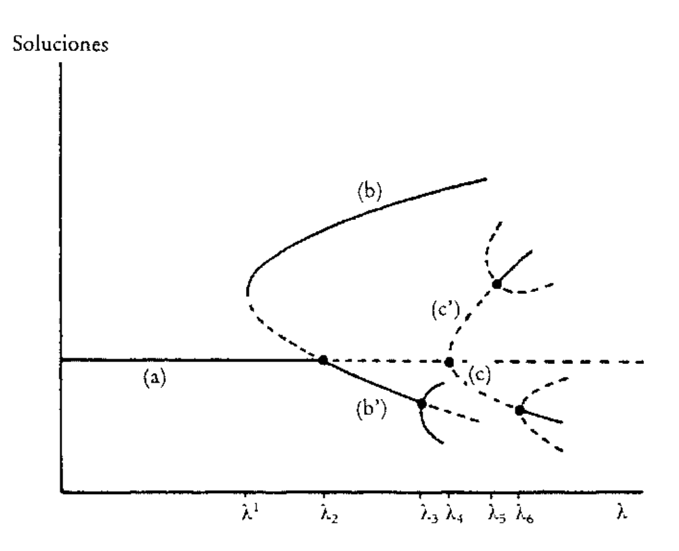


Figura 8. Diagrama de bifurcación. El parámetro de bifurcación es λ. Para $\lambda<\lambda_1$, hay un único estado estacionario para cada valor de λ o este conjunto de estados forma la rama *a*. Para $\lambda=\lambda_1$ son posibles otros dos conjuntos de estados estacionarios (ramas *b* y *b'*). Los estados de *b'* son inestables, pero pueden hacerse estables para $\lambda=\lambda_2$ mientras que los estados de la rama *a* se hacen inestables. Para $\lambda=\lambda_3$ la rama *b'* es inestable y aparecen otras dos ramas estables. Para $\lambda=\lambda_4$, la rama inestable *a* alcanza un nuevo punto de bifurcación, de donde surgen dos nuevas ramas que serán inestables hasta $\lambda=\lambda_5$ y $\lambda=\lambda_6$ respectivamente.

tivo. Un sistema demasiado pequeño estará enteramente dominado por su entorno. Su crecimiento le permite explorar nuevas zonas de estabilidad, descubrir nuevas clases de comportamiento.

La definición de un estado, más allá del umbral de inestabilidad, no es ya intemporal. Para ello, no basta referirse a la composición química y las condiciones del entorno. En efecto, ya no es deducible que el sistema se encuentra en *ese* estado singular, existen otros estados igualmente accesibles. Por tanto, la única explicación es histórica o genética: es necesario definir el camino que constituye el pasado del sistema, enumerar las bifurcaciones atravesadas y la sucesión de las fluctuaciones que han formado la historia real entre todas las historias posibles.

Nos vemos obligados a emplear, para definir de forma consistente los sistemas físico-químicos más simples, un conjunto de concep-

tos que hasta ahora estaban reservados a los fenómenos biológicos, sociales y culturales: los conceptos de historia, de estructura y de actividad funcional se imponen al mismo tiempo para definir el *orden por fluctuación*, el orden cuya fuente es el no-equilibrio.

7. *De Euclides a Aristóteles*

Uno de los aspectos más interesantes de las estructuras disipativas es, sin ninguna duda, su coherencia. El sistema se comporta como un todo, como si fuese el seno de fuerzas de largo alcance. A pesar del hecho de que las interacciones entre moléculas no exceden de un rango del orden de 10^{-8} cm, el sistema se encuentra como si cada molécula estuviese «informada» del estado global del sistema

Se ha dicho con frecuencia, y hemos tenido la ocasion de repetirlo, que la ciencia moderna nació cuando el espacio aristotélico, una de cuyas fuentes de información fue la organización y solidaridad del funcionamiento biológico, fue reemplazado por el espacio homogéneo e isótropo de Euclides. Sin embargo, mi teoría de las estructuras disipativas nos acerca más a la concepción de Aristóteles. Cualquiera que sea el fenómeno, reloj químico, ondas de concentración o distribuciones heterogéneas de productos químicos, la inestabilidad tiene como efecto la ruptura de simetría, tanto temporal como espacial. En un ciclo límite, no hay dos instantes equivalentes; la reacción química adquiere una *fase*, que es similar a la que caracteriza una onda luminosa, por ejemplo. Una vez más, cuando como resultado de una inestabilidad se favorece una dirección en especial, el espacio cesa de ser isótropo.

Es tentador especular que la ruptura de simetría espacio-temporal tiene un importante papel que jugar en el fascinante fenómeno de la morfogénesis. Estos fenómenos han llevado con frecuencia a la convicción de que debe existir alguna especie de finalidad, i.e. un plan realizado por el embrión cuando deviene un objeto completo. A principios de este siglo, el embriólogo alemán Hans Driesch creía que cierta «entelequia» inmaterial era responsable del desarrollo del embrión. Había descubierto que el embrión era capaz de soportar fuertes perturbaciones y, a pesar de ellas, desarrollarse en un organismo funcional normal.

Este problema es obviamente muy complejo y no podemos tratarlo aquí más que muy brevemente. Hace muchos años, los embrió-

logos introdujeron el concepto de campo morfogenético y propusieron la hipótesis de que la diferenciación de una célula depende de su *posición* en este campo. Pero, ¿cómo «reconoce» una célula su posición? Una idea a menudo debatida es la de un «gradiente» de una sustancia característica de uno o más «morfógenos». Estos gradientes podrían producirse como consecuencia de inestabilidades con ruptura de simetría en condiciones muy alejadas del equilibrio. Una vez formado, un gradiente químico puede proporcionar a cada célula un entorno químico diferente y, por tanto, inducir a cada una de ellas a sintetizar un conjunto específico de proteínas. Este modelo, ahora extensamente estudiado, parece estar en acuerdo con muchos casos investigados experimentalmente (en particular el de *Drosophila).* Es de especial interés en sistemas biológicos en los cuales el huevo empieza en un aparente estado simétrico (e.g. *Fucus, Acetabularia).* Pero ¿es el huevo realmente homogéneo al principio? Este problema no pone en cuestión directamente la pertinencia del modelo propuesto. Cualquiera que sea la respuesta, la inestabilidad, junto con las reacciones químicas y el transporte, parece ser el único mecanismo capaz de romper la simetría de un entorno inicialmente homogéneo. Incluso si hay pequeñas inhomogeneidades en el entorno inicial, su efecto parece ser el de canalizar la evolución hacia una estructura determinada cuando la ruptura de simetría se produciría de todos modos [8].

Podemos concluir, de forma más general, diciendo que las perspectivas abiertas por el descubrimiento de las estructuras disipativas permiten considerar un concepto del orden biológico que satisfaga el carácter específico del fenómeno del ser vivo, superando el antiguo conflicto entre reduccionistas y antirreduccionistas.

Desde Aristóteles (y hemos citado a Stahl, Hegel, Bergson y otros

[8] Hace más de veinte años, Waddington propuso un modelo del desarrollo embrionario como evolución bifurcante, como exploración progresiva —en el curso de la cual crece el embrión— de un mapa «epigenético» en donde coexisten zonas de desarrollo canalizado (Creodos) y zonas en donde es posible una elección entre varias vías de desarrollo. La estabilidad del creodo (el carácter más o menos vertical de las paredes del «canal») mide hasta qué punto la presión selectiva, si ha provocado la seguridad y la esterotipia en la construcción de tal o cual rasgo, ha llegado a disminuir el papel del entorno en dicha construcción. Por tanto, la estabilidad creódica según la hipótesis de Waddington no se identifica con la estabilidad de un sistema químico abierto en general, sino que constituye un caso particular, resultado de exigencias particulares de la presión selectiva sobre una población determinada. Véase Waddington, C. H., *The Strategy of the Genes*, Londres, Allen and Unwin, 1957.

«antirreduccionistas») se ha expresado siempre la misma convicción, a saber: la necesidad de un concepto de organización compleja que conecta entre sí los distintos niveles de descripción y toma en cuenta la relación entre el todo y el comportamiento de las partes. Como réplica a los reduccionistas, para quienes la única «causa» de organización yace en las partes, Aristóteles con su causa formal, Hegel con su surgimiento del Espíritu en la Naturaleza y Bergson con su simple e irrepresible acto de organización-creación, aseguran que el todo es lo predominante.

Citemos un pasaje particularmente claro de Bergson sobre este aspecto [9]: «En general, cuando un mismo objeto aparece simple en un aspecto e infinitamente complejo en otro, los dos aspectos no tienen de ninguna manera la misma importancia o más bien el mismo grado de realidad. En estos casos la simplicidad pertenece al mismo objeto y la infinita complejidad a las vistas que tomamos girando alrededor de él, a los símbolos con los cuales nuestros sentidos o intelecto nos lo representan o, más generalmente, a elementos *de un orden diferente,* con los cuales tratamos de imitarlo artificialmente, pero con los cuales permanece inconmensurable, al ser de una naturaleza distinta. Un artista genial ha pintado una figura en su lienzo. Podemos imitar esta pintura con mosaicos de muchos colores. Y reproduciremos las formas y las sombras tanto mejor cuanto más pequeñas sean las piezas, más numerosas y de variada tonalidad. Pero sería necesaria una infinidad de tonos, para obtener el equivalente exacto de la pintura que el artista concibió como algo simple, como algo que deseó trasladar como un todo al lienzo y que es tanto más completa cuanto mejor aparece como la proyección de una intuición indivisible».

En biología, el conflicto entre reduccionistas y antirreduccionistas ha parecido a menudo como un conflicto entre la afirmación de una finalidad externa [10] y la afirmación de una finalidad interna. La idea de una inteligencia organizadora inmanente ha sido con frecuencia opuesta a la de un modelo organizativo prestado por la tecnolo-

[9] H. Bergson, «L'Evolution créatrice», *op. cit.*, p. 571.

[10] La importancia de estas cuestiones de responsabilidad y finalidad, su relativa predominancia con respecto al desafío sin duda alguna fructífero que habría dado lugar a una descripción fina de las formas vivas y de su devenir, es sin duda uno de los puntos en los que se paga muy cara la identificación que hacia la ciencia clásica entre conocimiento y control o manipulación.

gía del momento (máquinas mecánicas, térmicas o cibernéticas), el cual hace permisible preguntar: ¿«quién» construyó esta máquina, este autómata que obedece a una finalidad externa?

Conocemos la respuesta de algunos biólogos contemporáneos, según los cuales, la organización biológica no puede tener otra explicación que la selección y acumulación de raras mutaciones favorables. La única particularidad de la organización, compatible con las leyes físicas, es la de poseer una vertiginosa improbabilidad con respecto a esas leyes. Pensamos que la dualidad mutación-selección disimula nuestra profunda ignorancia en cuanto a la relación entre el «texto» genético que es modificado por las mutaciones y el organismo vivo. ¿Cómo, por ejemplo, podemos pasar de una organización a otra? Es imposible prescindir de una teoría de la organización y sus transformaciones sin atenerse a las explicaciones del texto genético, cuyo carácter verbal establecieron Weiss y Waddington: las cualidades de organizador, regulador, programa, atribuidas a moléculas individuales, son expresiones tendenciosas. Atribuir a estas moléculas, mediante una metáfora antropocéntrica o tecnocéntrica, el poder de controlar, informar, regular a un nivel macroscópico es, según ellos, confundir el planteamiento del problema con su solución. La célula no es, de hecho, un circuito electrónico, esto es, no puede asimilarse a un conjunto en donde cada relé es en realidad capaz de determinar el funcionamiento global del sistema y puede considerarse en derecho como el responsable de este funcionamiento. El medio celular no posee el determinismo y la precisión de nuestros instrumentos tecnológicos. Consiste en una gran población de moléculas cuyo número de grados de libertad es infinitamente más alto que el mostrado por su comportamiento global resultante de su interacción [11].

Mientras que el funcionamiento de un circuito electrónico puede deducirse del tipo y posición de los relés de los que está constituido, ya que tanto los relés como el circuito se enmarcan *en la misma escala*, ya que fueron diseñados y construidos por el mismo ingeniero que diseñó toda la máquina, la coherencia del comportamiento esencialmente aleatorio de una población de moléculas biológicas no puede deducirse de la actividad reguladora de las enzimas. Esto plantea

[11] Weiss, P., *L'Archipel scientifique*, París, Maloine, 1974, y Waddington, C. H., especialmente en *Towards a Theoretical Biology*, tomos I y II, Edimburgo, The University Press, 1968 y 1969. Esta crítica sirve también para la «envoltura» genética.

el problema de la transición de una descripción de la actividad molecular al orden supramolecular de la célula.

Sin embargo, simplemente denunciar el reduccionismo implica correr el riesgo de repetir la crítica de Aristóteles a los atomistas de su época, de rechazar la idea de que todo puede deducirse del conocimiento de las partes en favor del viejo concepto de organización jerarquizada, i.e. un nuevo todo emergiendo en cada nivel, presuponiendo los constituyentes pero integrándolos en un comportamiento global gobernado por una lógica que les es ajena y que no pueden justificar. Nos vemos colocados ante una concepción más «equilibrada» de los papeles respectivos de las partes y de los parámetros macroscópicos que definen el sistema como un «todo». Esta concepción no es solamente válida para las estructuras físico-químicas en las cuales los aspectos moleculares, particularmente los mecanismos están inextricablemente enlazados a los aspectos supramoleculares. De lo que realmente este nuevo desarrollo en el campo de la física nos lleva a dudar es de la naturaleza general de lo que hemos denominado el «principio de orden de Boltzmann», i.e. lo que parece dictar el sentido común que la actividad media de una gran población corresponde a la media de los comportamientos individuales. Muy lejos del equilibrio, un régimen de funcionamiento puede parecer una *organización*, ya que es el resultado de la amplificación de una fluctuación microscópica, la cual, justo en el momento «indicado», ha favorecido un camino de reacción de entre muchos caminos igualmente posibles. En ciertas circunstancias, concluimos, el papel jugado por los comportamientos individuales puede ser decisivo.

Estudiaremos el límite al principio de orden de Boltzmann en el capítulo siguiente. Concierne no sólo a las ciencias físico-químicas, sino a todas las ciencias que se ocupan de la evolución de grandes poblaciones de individuos al comportamiento determinado por las interacciones locales.

Capítulo VI
ORDEN POR FLUCTUACIONES

1. *La ley de los grandes números*

El hecho de que las fluctuaciones pueden jugar un papel decisivo en la formación de un régimen macroscópico implica un profundo cambio en las relaciones entre los niveles microscópico y macroscópico, tales como las podía definir el principio de orden de Boltzmann.

Cada uno de nosotros tiene un sentido instintivo de lo que son las fluctuaciones y en qué circunstancias pueden despreciarse. Supongamos un gas compuesto de N moléculas encerrado en un recinto de volumen V. Dividamos este volumen en dos partes iguales. ¿Cuál será el número de partículas X en una de las dos porciones del volumen? La variable X es en este caso una variable «aleatoria» y esperamos que tenga un valor próximo a $N/2$.

Más exactamente, cuando observamos de manera repetida el número de partículas presentes en una mitad, debemos esperar que el valor medio de X definido [1] por la suma $X_1+X_2 \ldots +X_k$ dividida por

[1] $<X> = 1/k \sum_{i=1}^{k} X_i$.

el número de experiencias k, tienda hacia $N/2$. Sin duda habrá «fluctuaciones» cuyo tamaño está ligado a la *dispersión,* definida [2] como el valor medio del cuadrado de la diferencia entre el número de partículas observadas efectivamente en cada experiencia y el valor medio de $N/2$, $<(X-N/2)^2>$. Pero si el número de partículas es lo bastante grande, debemos esperar que las fluctuaciones sean despreciables con respecto a $N/2$). Este es el contenido de la *«ley de los grandes números»*, según la cual la dispersión será del *orden del valor medio* $<X>$ (es decir, $N/2$), lo que significa que las fluctuaciones pueden ser grandes en valor absoluto, pero que su valor *relativo* medido por la relación $\sqrt{<(X-N/2)^2>}\ /\ <X>$ es del orden de $1/\sqrt{N}$ y, por consiguiente, tiende a cero para un valor suficientemente alto de N. Así, cuando el sistema es lo bastante grande, la ley de los grandes números nos permite hacer una clara distinción entre valores medios y fluctuaciones y define estas últimas como despreciables.

La ley de los grandes números queda satisfecha por las leyes clásicas que figuran en los libros de cálculo de probabilidades, como la ley de Gauss, la ley de Poisson y otras muchas. Juega un papel de vital importancia en todos aquellos campos en los cuales se describe el comportamiento de una población. Ya hemos explicado que la ley de los grandes números, tal como la expresa el principio de orden de Boltzmann, permite la descripción termodinámica de sistemas complejos en términos de un *número restringido* de parámetros, tales como la presión, la temperatura, las concentraciones. No sería posible ninguna previsión física, social o económica si, en lugar de conservar el carácter despreciable que le asigna la ley de los grandes números, las fluctuaciones en grandes poblaciones pudieran *en todo momento* amplificarse hasta el punto de trastornar un estado que desde ese momento no podría ya llamarse estado medio.

Sin embargo, cuando aparecen estructuras disipativas, de una forma o de otra debe «invalidarse» esta ley. Existen amplificaciones de fluctuaciones inicialmente microscópicas . Los ejemplos de fenómenos de este tipo son abundantes, especialmente en biología. Ya hemos mencionado las amebas del moho del limo que se condensan en una masa supracelular.

Otra interesante ilustración del papel de las fluctuaciones corresponde a las primeras etapas de la construcción de un nido de termi-

---

[2] $<(X-N/2)^2> = 1/k \sum_{i=1}^{k} (X_i-N/2)^2$

tas. Esta construcción fue primero examinada por Grassé y Deneubourg la está estudiando desde el punto de vista que nos interesa aquí [3]. La construcción de un nido de termitas es una de esas actividades coherentes que han llevado a algunos científicos a especular sobre la «mente colectiva» en comunidades de insectos. Para escapar a la dificultad real que representa pero disimula este tipo de referencia, habría que mostrar que las termitas sólo necesitan de poca información para tomar parte en la construcción de un edificio tan enorme y complejo como un nido de termitas. La primera etapa en esta actividad, i.e. la construcción de la base, es el resultado de lo que en apariencia es el comportamiento desordenado de las termitas. En esta etapa transportan y depositan montoncitos de tierra, de una forma aleatoria, pero impregnando simultáneamente estos montoncitos con una hormona. Esta sustancia atrae a las otras termitas. La fluctuación inicial es simplemente una concentración algo mayor de montoncitos de tierra en algún punto del lugar. La amplificación de este acontecimiento se produce al incrementarse la densidad de termitas en la región, aumentándose simultáneamente la concentración de la hormona. Al ser más numerosas las termitas en este lugar, la probabiliad de que depositen sus montoncitos de tierra allí se incrementa. De esta forma se forman «pilares», separados por una distancia relacionada con el alcance de la influencia de la hormona. El ejemplo de las termitas es para nosotros un caso típico. Aunque el principio de orden de Boltzmann nos permite describir evoluciones en química o biología durante las cuales se igualan las diferencias, pierde su aplicabilidad en situaciones como estas, en donde algunas «decisiones» en una situación inestable pueden canalizar hacia una estructura global un sistema formado por un gran número de entidades.

2. *Fluctuaciones y cinética química*

Volvamos nuestra atención hacia la química. La cinética química no-lineal puede, como hemos visto, llevar a estructuras disipativas. Ya que estas estructuras son el resultado de la amplificación de fluc-

---

[3] J. Deneubourg, «Application de l'ordre par fluctuation á la description de certaines étapes de la construction du nid chez les termites», en *Insectes Sociaux, Journal International pour l'étude des Arthropodes sociaux*, tomo 24, núm. 2, 1977, pp. 117-130.

tuaciones inicialmente pertenecientes al nivel microscópico, debemos esperar encontrar alguna correlación entre el tipo de cinética química (e.g. etapas catalíticas) y las leyes de las fluctuaciones. Volveremos a encontrar aquí, a este nivel, lo que ya hemos discutido en relación con las leyes de la termodinámica. Nos vemos obligados a concluir que, cerca del equilibrio, las leyes de las fluctuaciones son *universales*, mientras que lejos del equilibrio, en sistemas en los que tienen lugar reacciones con cinética no-lineal, el valor relativo de la dispersión *ya no obedece* a la fórmula general antes mencionada. El destino de las fluctuaciones se hace específico; es necesario estudiar en cada caso particular *cómo y hasta qué punto* la dispersión relativa correspondiente a este caso se desvía en relación con la fórmula clásica explicada en la sección anterior. Las cuestiones surgidas en el estudio de las fluctuaciones en los sistemas de cinética no-lineal son aún recientes y se encuentran en pleno desarrollo. Citemos algunos resultados en este terreno todavía oscuro, pero apasionante.

Es, en especial, en la vecindad de los puntos de bifurcación, en donde el sistema puede «escoger» entre varios regímenes, donde puede esperarse que las fluctuaciones sean anormalmente grandes; las fluctuaciones pueden incluso alcanzar el mismo orden de magnitud que los valores medios macroscópicos. Queda entonces en entredicho la idea misma de una descripción macroscópica, i.e. de una distinción entre valores medios y fluctuaciones.

Pueden aparecer correlaciones entre acontecimientos normalmente independientes. Cuando nos acercamos al punto de bifurcación del Bruselador, el sistema se comporta como un *todo*. Se correlacionan regiones separadas por distancias macroscópicas: las velocidades de las reacciones que transcurren en estas regiones son interdependientes, teniendo los acontecimientos locales repercusiones a través de todo el sistema. Tal como lo hemos mencionado, ésta es una situación paradójica que desafía nuestra «intuición» en lo que respecta al comportamiento de grandes poblaciones. El caos indiferente del equilibrio abre paso a un caos activo del tipo invocado por algunos presocráticos, un caos que puede potencialmente ser el seno de diferentes estructuras. Dejemos ahora este «estado» singular para estudiar el caso en el que son posibles varios regímenes de funcionamiento diferentes y en el que una fluctuación puede hacer saltar de un sistema a otro. Sería interesante examinar con mayor detalle el mecanismo que amplifica las fluctuaciones. Una conclusión general se hace casi obvia: una fluctuación no puede dominar todo el sistema de una sola

vez. Debe primero establecerse en una región limitada. Dependiendo de que el tamaño de esta región inicial esté por debajo o por encima de un cierto valor crítico (el cual, en el caso de las estructuras disipativas químicas, depende en particular de las constantes cinéticas y de los coeficientes de difusión) la fluctuación bien se amortigua bien se expande a todo el sistema. Esto es un fenómeno de *nucleación,* con el cual nos hemos familiarizado en la teoría clásica de transiciones de fase: por ejemplo, en un gas hay una incesante formación y evaporación de gotas de condensación. Sin embargo, cuando la temperatura y la presión alcanzan un punto en donde el estado líquido se hace estable, existe un tamaño crítico de gota que es más pequeño cuanto más baja sea la temperatura y más alta la presión. Si el tamaño de esta gota excede de este «umbral de nucleación», el gas se transforma casi instantáneamente en líquido.

Aquí, como en el caso de la morfogénesis, o del comportamiento de las termitas y las amebas del moho del limo, el sistema, formado por infinidad de elementos en interacción con las fuerzas de corto alcance, se comporta como un todo, como si cada molécula estuviera «informada» del estado del conjunto.

Los primeros trabajos llevados a cabo hoy día nos han permitido establecer una inesperada conclusión general: el tamaño crítico es tanto más grande y la fluctuación desestabilizante tanto más rara cuanto mayor es la difusión que une todas las regiones del sistema —y en particular, la región fluctuante con su entorno—.

En otras palabras, cuanto mayor sea la velocidad de comunicación dentro del sistema, mayor será el porcentaje de fluctuaciones insignificantes que son incapaces de cambiar el estado del sistema, i.e. mayor será la estabilidad del sistema. ¿Cómo puede entenderse este concepto de tamaño crítico? Es la consecuencia del hecho de que el «mundo exterior», el entorno de la región fluctuante, siempre tiende a amortiguar las fluctuaciones. Estas últimas serán entonces o destruidas o amplificadas, según la efectividad de las comunicaciones entre la región fluctuante y el mundo externo. La talla crítica es una medida del cociente entre el volumen en el cual tienen lugar las reacciones y el área de contacto, a través de la cual esta región interacciona con el mundo exterior. La talla crítica viene en consecuencia determinada por una competición entre el «poder integrante» del sistema y los mecanismos químicos que amplifican la fluctuación dentro de la subregión fluctuante.

Esta es una respuesta parcial a una pregunta surgida en modelos

ecológicos [4], i.e. la de los límites a la complejidad. Puede mostrarse que en realidad cuanto más complejo es un sistema, tanto más numerosas son las clases de fluctuaciones potencialmente peligrosas para cualquier estado. ¿Cómo, se han preguntado, pueden existir sistemas tan complejos como las organizaciones ecológicas o humanas? ¿Cómo se las arreglan para evitar el caos permanente? Probablemente, en sistemas muy complejos, en donde las especies e individuos interaccionan de muy diferentes maneras, la difusión, es decir, la comunicación entre los distintos puntos del sistema es también rápida. En este caso, el umbral de nucleación de las fluctuaciones peligrosas garantiza una cierta estabilidad. En este sentido, la máxima complejidad alcanzable por la organización de un sistema antes de hacerse inestable vendría determinada por la velocidad de comunicación.

Citemos algunos ejemplos, seleccionados un poco al azar, que parecen indicar que el concepto de nucleación pudiera ser singificativo en el estudio de los fenómenos sociales. Grupos pequeños, aislados e incluso perseguidos por el resto de la sociedad, pueden ser el origen de algunas de las innovaciones que han transformado la sociedad. Grupos minoritarios que ocupan una posición marginal con respecto a los cauces dominantes han tenido un destacado poder innovador en la historia. Quizá, como han declarado algunos pesimistas, la velocidad con la cual viajan las noticias en nuestra época reduce muchos acontecimientos al nivel de meras anécdotas insignificantes y transforma cualquier idea en espectáculo y moda.

Por último, siempre de un modo sugestivo y no demostrativo, no resistiremos la tentación de citar el análisis que hizo Gabriel Tarde del chismorreo como determinante de las costumbres de una sociedad: «El papel social del chismorreo es inmenso. Supongamos que en una pequeña ciudad de la Antigüedad o de la Edad Media no hubiera existido el chismorreo, ¿acaso podrían haber sobrevivido las instituciones y prejuicios hereditarios que forman la sustancia y la fuerza de esos pequeños estados...? El chismorreo es una inquisición continua y recíproca, espionaje y supervisión de todos por todos a todas horas del día y de la noche. Gracias a él, todos los muros de las casas son de cristal transparente... Lo que hace que las grandes ciudades, y sobre todo las capitales modernas, sean focos de corrupción moral

---

[4] R. May, *Stability and Complexity in Model Ecosystems*, Princeton, The University Press, 1973.

y de degeneración de costumbres e instituciones nacionales, es que no se chismorrea» [5].

En contrapunto, para terminar, podemos plantear la cuestión que hoy sugieren los progresos de la tecnología de la información: ¿qué sería del «sistema democrático» en una sociedad en la cual los medios de comunicación permitieran que cada persona fuera permanentemente consultada por un representativo poder central y que la velocidad de comunicación dominase completamente la de las interacciones no-lineales locales entre individuos? ¿No sería esto la realización de un orden extremadamente estable y conservador? Pero nos encontramos demasiado lejos de preguntas a las que hoy queremos responder.

3. *Estabilidad de las ecuaciones cinéticas*

De manera casi irresistible, hemos pasado de estudiar la estabilidad de los estados de no-equilibrio de los sistemas físico-químicos a las implicaciones del concepto de estabilidad en sistemas más complejos, biológicos, ecológicos o sociales. En este marco, es interesante ampliar el concepto de estabilidad, de tener en cuenta el hecho de que fluctuaciones como la de la densidad de las poblaciones que participan de la actividad de un sistema están lejos de ser las únicas posibles.

Señalemos en primer lugar que en el caso de los sistemas biológicos o ecológicos, la idea de una interacción constante con el medio es poco realista; la célula, como los «nichos» ecológicos, depende de su entorno, pero éste es variable y los flujos que mantienen al sistema lejos del equilibrio fluctúan. Desde el punto de vista de la modelización, tan sólo recientemente se ha podido demostrar que las fluctuaciones de origen externo, al igual que las de origen interno, pueden generar nuevas estructuras; en determinadas circunstancias, el ruido, la perturbación aleatoria de las condiciones del entorno, pueden convertirse en fuente de orden [6].

---

[5] Tarde, G., *Ecrits de psychologie sociale*, selección de textos presentados por Rocheblave-Spenle, A. M., y Milet, J., Toulouse, Privat, 1973, p. 191.

[6] Arnold, L.; Horsthemke, W., y Lefever, R., «White and Coloured External Noise and Transition Phenomena in Non Linear Systems», en *Zeitschrift für Physik B*, vol. 29, 1978, pp. 367-373, y aplicado a un caso biológico particular, Lefever, R., y

Esta sensibilidad de los estados de no-equilibrio no solamente a las fluctuaciones generadas por su actividad interna, sino también a aquellas procedentes de su entorno, nos reafirman en la idea de que las estructuras disipativas son en cierto sentido «traducciones» de los flujos que las alimentan. No es, por tanto, extraño descubrir una «organización adaptativa» de la actividad del sistema como una función de las condiciones de contorno fluctuantes, ya que esto no es sino un aspecto más de su participación en su propio entorno.

Sin embargo, existe otra fuente de inestabilidad, otro tipo de fluctuación. Como hemos mencionado, las fluctuaciones cuyos efectos hemos estado considerando involucran constituyentes que ya pertenecen al sistema. Pero, ¿qué sucedería si, como resultado de ciertos acontecimientos incontrolables (e.g. mutaciones, innovaciones técnicas), se introdujesen constituyentes de un nuevo tipo que pudiesen tomar parte en los procesos del sistema y multiplicarse con su ayuda? El problema de la estabilidad con respecto a este tipo de cambio puede formularse de la siguiente manera: los nuevos constituyentes, introducidos en pequeñas cantidades, llevan a un nuevo conjunto de reacciones entre los componentes del sistema. Este nuevo conjunto de reacciones entra entonces en competencia con el modo de funcionamiento preexistente dentro del sistema. Si el sistema es «estructuralmente estable» frente a esta intrusión, el nuevo modo de funcionamiento será incapaz de establecerse y los «innovadores» no sobrevivirán. Si, por el contrario, la fluctuación estructural se impone con éxito, si, por ejemplo, la cinética con la cual se multiplican los «innovadores» es lo suficientemente rápida para que éstos invadan el sistema en vez de ser destruidos, el sistema global adoptará el nuevo modo de funcionamiento, su actividad estará gobernada por una nueva «sintaxis» [7].

El ejemplo más simple es el de una población de macromoléculas reproducidas por polimerización dentro de un sistema alimentado

---

Hortshemke, W., «Bistability in Fluctuating Environments. Implications in Tumor Immunology», en *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 41, 1979.

[7] P. M. Allen, «Darwinian Evolution and a Predator-Prey Ecology», en *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 37, 1975, pp. 389-405, y «Evolution Population and Stability», en *Proceedings of the National Academy of Science USA*, vol. 73, núm. 3, 1976, pp. 665-668. Véase también R. Czaplewski, «A Methodology for Evaluation of Parent-Mutant Competition», en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 40, 1973, pp. 429-439.

con los monómeros *A* y *B*. Supongamos que el proceso de polimerización es autocatalítico, i.e. un polímero ya sintetizado se utiliza como modelo para la formación de una cadena con idéntica secuencia. Este tipo de síntesis es más rápido que aquel en el que no hay modelo para copiar. Cada tipo de polímero caracterizado por una secuencia peculiar de *A* y *B*, puede describirse con un conjunto de parámetros que miden la velocidad de síntesis de la copia que cataliza, la precisión del proceso de copia y la vida media de la misma macromolécula. Puede demostrarse que, en ciertas condiciones, un único tipo de polímero con una secuencia, digamos, *ABABABAB*..., domina la población, siendo los otros polímeros no más que fluctuaciones con respecto a él. El problema de la estabilidad estructural surge cada vez que, como resultado de un «error» en la copia, aparece en el sistema y empieza a multiplicarse un nuevo tipo de polímero caracterizado por una secuencia hasta entonces desconocida y por un nuevo conjunto de parámetros, compitiendo con la especie dominante para la obtención de monómeros *A* y *B*. Es posible, en determinados casos, construir con estos parámetros una magnitud cuyo valor determine el resultado de esta competición. Si la especie mutante se caracteriza por un valor de esta magnitud superior al de la especie dominante, será capaz de invertir la relación de fuerzas, de reducir la antigua especie dominante a concentraciones insignificantes y de derivar la nueva «norma» que defina todas las demás secuencias como errores y desviaciones sin consecuencias.

Este ejemplo es muy importante porque ha constituido sin duda un motor de la evolución prebiótica: Eigen [8] demostró que, en efecto, existe un tipo de sistema que podía resistir los «errores» engendrados constantemente por las poblaciones autocatalíticas que acabamos de describir. Este sistema consta de dos conjuntos de descendientes. Las moléculas del primer grupo desempeñan un papel de tipo «ácido nucleico»: cada una de ellas es capaz de autorreproducirse y sirve de catalizador en la síntesis de una molécula del segundo grupo; ésta última desempeña un papel «proteínico», sirve de catalizador en la síntesis autorreproductiva de otra molécula del primer grupo. Esta asociación transcatalítica entre dos conjuntos de descendientes puede encerrarse en un círculo cerrado (cada «ácido nucleico» se autorreproduce con ayuda de una «proteína» y cataliza la síntesis de

[8] Véase, para el estado actual de estas investigaciones, M. Eigen y P. Schuster, *The hypercycle;* Berlín, Springer, 1979.

otra «proteína»). Desde ese momento, es capaz de sobrevivir de manera estable, al abrigo de los constantes trastornos de las relaciones de fuerzas y de los cambios de población dominante. Entonces puede comenzar sobre esta base estable un nuevo tipo de evolución en el que se puede ver un precursor del código genético.

Otro ejemplo es el de la competición por un determinado nicho ecológico. Ejemplo muy simple, porque aquí, como en el primer caso, los «mutantes» no introducen relaciones verdaderamente nuevas, sino únicamente la posibilidad de explotar el nicho, de reproducirse y de sobrevivir de una manera cuantitativamente distinta, caracterizada por otros valores de los parámetros, pero por las mismas ecuaciones (en este caso, a menudo construidas *a posteriori*).

Citemos, ya que se trata de una ecuación clásica en el campo de la ecología teórica, la ecuación que expresa la evolución de una población en un medio ecológico estable. La población caracterizada por el número N de individuos se reproduce con una tasa r, mientras que su tasa de mortalidad es m. Por otra parte, el crecimiento de la población está limitado por la cantidad de recursos disponibles, medidos por el parámetro K, $dN/dt=rN(K-N)-mN$. Para una población determinada, definida en este caso tan simple por un determinado valor de las tres constantes, el crecimiento de la población es definido por una curva llamada logística, que tiende asintóticamente hacia un valor de $N=K-m/r$. Cuando la población alcanza este valor, el medio está saturado y, por término medio, mueren en cada instante tantos individuos N como nacen (figura 9).

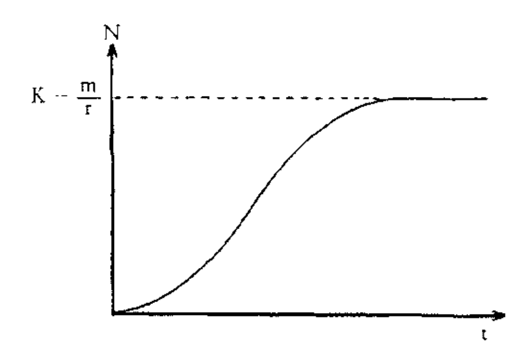


Figura 9. Curva logística: el estado estacionario $N=0$ es inestable, el estado estacionario $N=K-m/r$ es estable con respecto a las fluctuaciones de N.

Tenemos aquí la imagen habitual de un mundo ecológico que tiende hacia un estado estacionario estático. Sin embargo, esto no es lo que puede desprenderse del modelo, porque, para una evolución a largo plazo, la ecuación de crecimiento, en lugar de dejar una población en esta especie de equilibrio invariante, permite estudiar una evolución en principio sin límite, sin un óptimum estable, una evolución que no permite hablar de fin ni de finalidad.

La evolución biológica nos muestra, en efecto, que los valores de los parámetros ecológicos K, r y m son esencialmente variables, que las sociedades vivas no cesan de introducir nuevas maneras de explotar los recursos existentes o de descubrir otros nuevos (incremento de K), no cesan de encontrar nuevos medios de prolongar su vida, o de multiplicarse más rápidamente. Cada equilibrio ecológico no es entonces más que temporal y un nicho será ocupado sucesivamente por una serie de especies, cada una de ellas capaz de expulsar a la precedente cuando su «aptitud» para explotar el nicho, medida por la cantidad $K-m/r$, aumenta. Tenemos aquí, en un caso muy simplificado, una formulación cuantitativa de la idea darwiniana de la «supervivencia del más apto» (figura 10).

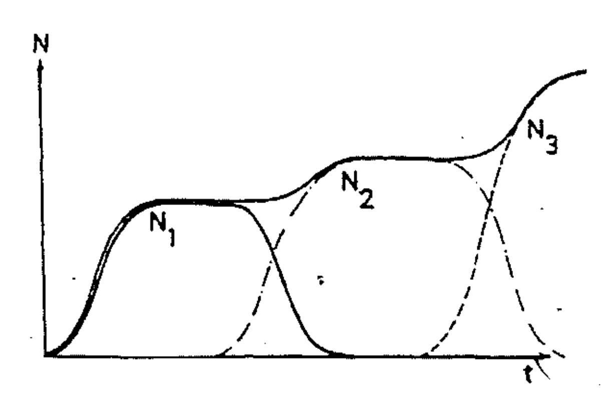


Figura 10. Sucesión de estados estacionarios alcanzados por diferentes poblaciones caracterizadas por valores crecientes N_1, N_2, N_3, de la magnitud $K-m/r$.

Es interesante notar que la misma curva que muestra la sucesión de crecimientos y picos puede también, en muchos casos, utilizarse para describir la multiplicación de ciertos procedimientos técnicos.

Aquí, también, el descubrimiento o la introducción de una nueva técnica o de un nuevo producto puede decirse que rompe un equilibrio social, tecnológico o económico descritos por el máximo alcanzado por la curva de crecimiento de las técnicas o productos con las cuales la innovación va a competir [9]. Así, si escogemos un ejemplo entre los muchos disponibles, podemos decir que no solamente la difusión del vapor llevó a la desaparición de la mayoría de los barcos de vela, sino que también con la reducción del coste de transporte y el aumento de su velocidad causó un incremento en la demanda de transporte marítimo y, consecuentemente, un incremento en el número de barcos. Como en el ejemplo considerado en ecología, tenemos aquí una situación muy simple, ya que la innovación sólo satisface, aunque de forma distinta, una necesidad preexistente. Sin embargo, tanto en ecología como en las sociedades humanas, muchas innovaciones tienen éxito sin la necesidad de un «nicho» preexistente. Transforman el entorno en el cual aparecen y, a medida que se difunden, crean las condiciones necesarias para su propia multiplicación, i.e. su propio «nicho».

Así, siguiendo un razonamiento de este tipo, se construyó en Bruselas un argumento que pone en escena una dinámica de la urbanización regional sobre la base de hipótesis de «racionalidad» económica que corresponden al modelo del geógrafo Christaller para la óptima distribución jerarquizada de los centros de actividad económica (redes hexagonales de ciudades de tamaño equiparable, cada una de ellas rodeada por un anillo hexagonal de ciudades del siguiente orden de tamaño, etc.). Este modelo ha estudiado el caso en el cual un conjunto de ecuaciones extensión de la ecuación logística conecta el crecimiento de una región dada al número y tamaño de las fábricas que allí están localizadas. A su vez, las fábricas crecen de acuerdo con la demanda de sus productos, que es una función de las concentraciones locales de población que son sus potenciales consumidores, de la competencia de otras industrias que manufacturan productos similares y, a través del precio del producto, del coste del transporte y del tamaño de la fábrica. Las poblaciones y las industrias manufactureras tienen entonces sus crecimientos respectivos conectados por fuertes no-linealidades. Toda industria que trate de expandirse en una cierta

[9] E. W. Montroll, «Social Dynamics and the Quantifying of Social Forces», en *Proceedings of the National Academy of Science USA*, vol. 75, núm. 10. 1978, pp. 4633-4637.

región entra en competencia con las industrias del mismo tipo localizadas en otras regiones, con el propósito de satisfacer una demanda que también es variable. Este escenario hace de la localización de centros urbanos el resultado de la interrelación entre «leyes», en este caso de naturaleza puramente económica, y el «azar» que gobierna la instalación de un determinado tipo de industria en un determinado lugar y en un determinado momento. Cuando la distribución simétrica de Christaller refleja una optimización estática, este escenario, el cual permite seguir los crecimientos, las coexistencias y las destrucciones de empresa, describe *rupturas de simetría*, la amplificación de pequeñas diferencias y la multiplicidad de posibles historias que pueden acontecer en el establecimiento de diferenciaciones geográficas [10].

Las innovaciones pueden ciertamente verse seleccionadas, pero muy a menudo por un entorno que han contribuido a crear. El proceso evolutivo no tiene, por tanto, necesariamente como motor la presión selectiva, su lógica no es pura y simplemente la de las exigencias del medio [11].

Otras típicas situaciones de evolución biológica pueden investigarse utilizando modelos bastante similares. Por ejemplo, es posible calcular bajo qué condiciones de competencia entre especies por un recurso determinado, puede ser ventajoso que una fracción de la población se especialice en una actividad guerrera y no productiva (e.g. los «soldados» en las sociedades de insectos). Puede también determinarse en qué clase de medio una especie que se ha especializado, que ha restringido su rango de recursos alimenticios, sobrevivirá más fácilmente que una especie no especializada, que consume de manera menos económica una mayor variedad de recursos. Por fin, la

---

[10] P. M. Allen y M. Sanglier, «Dynamic Model of Urban Growth», en *Journal for Social and Biological Structures*, vol. 1, 1978, pp. 265-280.

[11] Se ha sugerido con frecuencia que el desarrollo del cerebro es el caso más espectacular de proceso evolutivo que sobrepasa las necesidades de adaptación al medio. En conexión con esto, véase Washburn, quien escribió en «The Evolution of Man» (*Scientific American*, vol. 239, 1978, p. 194): «El cerebro, con el cual el hombre empieza a comprender su largo pasado biológico, se desarrolló bajo condiciones que cesaron de existir hace tiempo. El cerebro evolucionó en tamaño y en complejidad neurológica en un espacio de tiempo de algunos millones de años, a lo largo de los cuales nuestros antepasados vivieron bajo la obligación diaria de actuar y reaccionar sobre la base de una muy deficiente información. Lo que es peor, esta información era falsa... Aún así, el cerebro era el mismo cerebro que hoy estudia las sutilezas de las matemáticas modernas y de la física.»

exigencia de la estabilidad de un sistema formado por una población de presas, que vive de los recursos de un determinado entorno y por una población de predadores, que viven de la primera población, permite prever ciertas tendencias evolutivas a largo plazo y qué innovaciones podrán hacer evolucionar al sistema sin destruirlo, sin llevar consigo la exterminación de las poblaciones [12].

Nadie se sorprenderá de vernos, a lo largo de este capítulo, proponer enfoques que hacen poco caso de las distinciones académicas mejor reconocidas y, especialmente, de aquéllas que separan las ciencias de lo animado y lo inanimado. Creemos, como Leibniz y otros muchos, que el hecho de separar es tan vano como el de dividir las aguas de los océanos, aun cuando este gesto no carezca de consecuencias intelectuales e institucionales. Sin embargo, estudiemos algunas consideraciones sobre la comunicación entre la físico-química y las ciencias de las poblaciones vivas y las sociedades.

Ante todo, debemos subrayar que no se trata de una comunicación en sentido único. De esta forma, en lo que concierne a las estructuras disipativas, con los conceptos de crisis e inestabilidad que las acompañan, podemos anticipar que las resonancias que despertaron en la propia física están relacionadas con el interés que suscitan dichas ideas en la cultura contemporánea. Además, sin la exploración que hizo la bioquímica de las vías metabólicas con sus múltiples no-linealidades, la condición de no-linealidad impuesta por la termodinámica para la inestabilidad del estado estacionario en cuestión habría parecido demasiado apremiante: en aquella época las no-linealidades eran prácticamente desconocidas en el mundo inorgánico.

En el estudio de estos estados de equilibrio, la mecánica termodinámica, encontró a finales del siglo XIX fructíferas resonancias en biología y en las ciencias de las sociedades. Es inútil subrayar que la carga intelectual y afectiva del concepto de equilibrio le viene no de la ciencia matemática de Bernoulli, d'Alembert, Euler, Lagrange, sino de ideas y de armonías procedentes de campos totalmente distintos. Y son estas mismas ideas las que dieron su importancia a los métodos físicos y matemáticos cuando penetraron finalmente en la biología, la economía y la sociología.

---

[12] J. L. Deneubourg y P. M. Allen, «Modèles théoriques de la division du travail dans les sociétés d'insectes», *Académie Royale de Belgique, Bulletin de la Classe des Sciences*, tomo LXII, 1976, pp. 416-429, y P. M. Allen, «Evolution in a Ecosystem wich Limited Ressources», *loc, cit.*, pp. 408-415.

Más recientemente, sabemos cuán fructíferamente se ha hecho uso de las matemáticas discretas y qué gran fuente de inspiración han sido las teorías de la información. Hemos hablado mucho, a lo largo de este libro, de una física que desencantaba el mundo, negando la complejidad y la diversidad. Pero la teoría de la información descubrió un mundo «encantado», descifró mensajes que circulan y que dan sentido en la naturaleza. Los modelos de «coevolución», en los que se emiten mensajes visuales o químicos, pero cuyo significado es distorsionado, captado por receptores piratas o por emisores piratas [13]; los trabajos sobre el cáncer o la inmunología, en los que se descubren complejos conjuntos de comunicaciones intercelulares, testifican, entre otros muchos, que las teorías de la comunicación están aún dando sus primeros pasos, sobre todo si se combinan con los estudios que llevan a la dinámica de las poblaciones que se comunican.

Si queremos situar la aportación hecha por los conceptos de no-linealidad, inestabilidad, amplificación de pequeñas fluctuaciones, debemos comenzar subrayando que las ciencias sociales no han esperado a que la física definiera los diferentes procesos según las perspectivas que acabamos de explicar. Así, para referirnos al «estructuralismo» que a menudo se define como estático, nos remitimos a los últimos capítulos del *Cours de linguistique générale*, en el cual Saussure describe la propagación de las «ondas lingüísticas» sujetas a dos tipos de fuerzas, la «interrelación» que crea la comunicación y el «espíritu de aldea» que mantiene las peculiaridades locales. De la misma forma, las reflexiones de Lévi-Strauss sobre la dinámica de la civilización occidental en sus relaciones con otras culturas recurren con

[13] La coevolución, en particular, parece haber jugado un papel en la historia común de las plantas y de los insectos. Conocemos la adaptación lograda en torno al problema de la fecundación de las plantas, pero existe otra dimensión recientemente explorada, la de la verdadera escalada en la «guerra química» que enfrenta a plantas e insectos. Muchas plantas son ricas en «sustancias secundarias» a menudo tóxicas, cuyo papel metabólico permanecía oscuro. De hecho, con frecuencia se trata de medios de defensa contra insectos y otros herbívoros. Y comienza la escalada: una raza de insectos consigue metabolizar el veneno y, al gozar desde ese momento de la exclusividad de un recurso nutritivo, se convierte en especialista, el veneno *le atrae;* acumulado en las glándulas, este veneno sirve algunas veces de defensa contra los pájaros; y otros insectos, químicamente inofensivos, desarrollan finalmente una similitud con los primeros para aprovecharse de la protección creada por la repulsión de los pájaros. Sobre este tema, véase Ehrlich, P., y Raven: «Butterflies and Plants», en *The Scientific American*, vol. 216, 1967, pp. 104-113, y el artículo clásico de Fraenkel, G. S., «The Raison d'Etre of Secondary Plant Substances», en *Science*, vol. 129, 1959, pp. 1466-1470.

bastante naturalidad a conceptos también utilizados en las ciencias de la naturaleza. En particular, se caracteriza allí el proceso de industrialización como un proceso auto-acelerado (reacciones en cadena) creador de diferencias internas (rupturas de simetría), como un proceso abierto a otros sistemas desde los cuales han sido alimentados algunos de sus circuitos, consecuentemente modificados de manera irreversible. El etnólogo puede muy bien escribir: «La relación de extrañeza entre las sociedades llamadas subdesarrolladas y la civilización mecánica, consiste sobre todo en el hecho de que en ellas esta civilización encuentra su propio producto o, más exactamente, la contrapartida de las destrucciones que ha llevado a cabo en ellas para instaurar su propia realidad» [14].

Queda el hecho de que las teorías de antropología estructural referidas a estructuras elementales de parentesco y su aproximación a los mitos, cuyas transformaciones han sido con frecuencia comparadas al crecimiento cristalino, utilizaban fundamentalmente las herramientas de la lógica y de las matemáticas finitas en las que se cuentan, distribuyen, combinan elementos discretos, en contraste con los que analizan una evolución en términos de procesos que comprenden poblaciones grandes y caóticas. Estamos ante dos puntos de vista que corresponden a dos tipos de modelos que Lévi-Strauss define respectivamente como «mecánicos» y «estadísticos». En el modelo mecánico, «los elementos se encuadran en la misma escala que los fenómenos» y, por ejemplo, los comportamientos individuales responden a prescripciones que se refieren a la organización global de la sociedad. La etnología estudia la lógica de estos comportamientos, mientras que la sociología trabaja con modelos estadísticos, definiendo medias y umbrales [15].

El modelo mecánico no es más que un modelo; como diría un aristotélico, representa hacia dónde tiende el funcionamiento de ciertas organizaciones, tales como un ministerio, por ejemplo, en donde cada funcionario sólo debe cumplir con la tarea que se le asigna según el organigrama. Por el contrario, las termitas y otros insectos sociales parecen aproximarse al modelo estadístico. No obedecen a prescripciones o informaciones referidas al todo; solamente se especifican las

[14] «Humanisme et Humanités», en *Anthropologie structurale II*, París, Plon, 1973, pp. 368-369.

[15] «Méthode et enseignement», en *Anthropologie structurale*, París, Plon, 1958, pp. 311-317,

interacciones entre individuos que favorecen o inhiben determinados tipos de comportamiento. Desde ese momento, las descripciones son por definición medidas y la cuestión que se plantea, por ejemplo, es la del umbral a partir del cual un conjunto de interacciones individuales puede producir un efecto singular a nivel de la población. Por tanto, se distinguen claramente el nivel de descripción local, en el que el comportamiento se considera como estocástico y el global y, por definición, grande, en el que se puede generar un comportamiento colectivo.

Hay una gran distancia entre las perspectivas que hemos mencionado y una teoría general de la sociead, y nosotros tenemos la intención de tratar de franquearla. Tan sólo sabemos que la presencia de interacciones no-lineales en una población determina la posibilidad de que aparezcan modos de evolución particulares (efectos bola de nieve, propagaciones epidémicas, diferenciación por ampliación de pequeñas diferencias), sea cual sea la población. Impone ciertas preguntas: ¿qué acontecimientos, qué innovaciones desaparecerán y cuáles podrán afectar al régimen global o determinar irreversiblemente la elección de una evolución? ¿Cuáles son las situaciones a escoger y cuáles son los regímenes de estabilidad? Y, en la medida en que el tamaño o la densidad del sistema pueden jugar el papel del parámetro de bifurcación, ¿cómo puede un crecimiento puramente cuantitativo abrir la posibilidad de elecciones cualitativamente nuevas?

Sin embargo, aún quedan muchas preguntas sin respuesta y, en particular, la de la descripción de una evolución que hace más «mecánica» una serie de acontecimientos. ¿De qué manera, por ejemplo, la selección de la información genética que gobierna los ritmos y las regulaciones de las reacciones metabólicas favorece ciertos caminos, de tal forma que el desarrollo parece tener una finalidad o ser la traducción de un mensaje? Conocemos el problema del «creodo» de Waddington, con su doble imperativo de seguridad y flexibilidad. Es un problema que hay que recordar, dadas las molestas confusiones posibles entre el desarrollo biológico y las evoluciones que no repiten una larga historia y que, por tanto, no son canalizadas o carecen de finalidad.

En un espacio en el que las distinciones de este tipo serán claramente formuladas, se podrán plantear los problemas de la organización y, especialmente, el de las situaciones en las que se conjugan la estadística y la mecánica, es decir, en donde coexisten las interacciones locales y la información global.

4. *Azar y necesidad*

Como ya hemos ilustrado de muchas formas, el orden por fluctuación lleva al estudio del juego entre azar y necesidad, entre innovación provocadora y respuesta del sistema; nos lleva a distinguir entre los estados del sistema en los que toda iniciativa individual está condenada a la insignificancia y las zonas de bifurcación en las que un individuo, una idea o un comportamiento nuevo pueden trastornar el estado medio. Esto no sucede con cualquier individuo, idea o comportamiento, sino sólo con aquéllos que son «peligrosos», aquéllos que pueden utilizar en su propio beneficio las relaciones no-lineales que hacen nacer un orden determinado del caos de los procesos elementales y que pueden, llegado el caso, en otras condiciones, determinar la destrucción de este orden, la aparición, más allá de otra bifurcación, de otro régimen de funcionamiento.

Como tampoco se admite la oposición entre azar y necesidad, el concepto de orden por fluctuación no implica por tanto la distinción (tradicional en ciertas escuelas sociológicas) entre funcional y disfuncional. Lo que en un momento dado es una desviación insignificante con respecto a un comportamiento normal, puede, en otras circunstancias ser fuente de crisis y renovación. Si hay algo que los modelos del orden por fluctuación pueden enseñarnos es que toda norma nace de una elección, contiene un elemento de azar, pero no de arbitrariedad. El hecho de que una organización o un régimen de funcionamiento no puedan deducirse como necesarios y de que siempre estén a merced de una fluctuación, no significa, y debemos hacer hincapié en esto, que sean arbitrarios. Como decía lacónicamente Samuel Butler, *nothing is ever merely anything* [16]: una organización o un régimen de funcionamiento no deducible de una ley general es, sin embargo, resultado de un *cálculo* en una naturaleza en la que los procesos macroscópicos estables son engendrados por una multitud de procesos desordenados y, en determinadas condiciones, a merced de las fluctuaciones de las cuales son producto.

Hemos hablado en muchas ocasiones de «azar» y «necesidad». Esto nos vuelve a llevar al terreno sobre el cual se ha discutido con mayor precisión el problema de la evolución, el terreno de la biología. En su interesante libro en que comenta las implicaciones filosó-

---

[16] Citado en J. Needham; Time, *The refreshing River*, Londres, Allen and Unwin, 1943, p. 183.

ficas de los descubrimientos de la biología molecular, Jacques Monod concluye que la evolución biológica y, por tanto, el hombre como producto de esta evolución, son el resultado de los efectos combinados del azar y la necesidad, azar de las mutaciones, necesidad de las leyes físicas y estadísticas de la selección natural. Retomaba así el principal descubrimiento de Darwin, la influencia decisiva de determinados acontecimientos particulares e improbables, como la aparición de descendientes mejor adaptados a su entorno, pero le confería una nota trágica: el Universo «normal», el que podemos deducir de las leyes de la naturaleza, es un Universo sin vida; las únicas leyes predecibles y reproducibles son las que gobiernan la muerte y el retorno a lo inanimado, como la cristalización, de la cual Monod hace el principio de toda morfogénesis. El azar —milagro estadístico de la aparición del código genético y sucesión de las mutaciones favorables— y, por tanto, opuesto a la legalidad natural; el azar extrae a la criatura viviente del orden inanimado de la naturaleza y lo transforma en un ser viviente al que se le concede un tiempo al borde del Universo en el cual representa una particularidad arbitraria.

La gran lucidez de Monod ilustra la notable estabilidad de la situación conceptual creada por la ciencia moderna. Según su interpretación, la biología contemporánea constituye la expresión culminante de la ciencia clásica: parece justificar al biólogo que afirma que la reducción de la complejidad de la vida en sus partes constituyentes, de comportamiento simple, es en principio suficiente, que entiende que no es necesaria ninguna teoría positiva de la organización biológica y de sus transformaciones y, por tanto, considera que lo que Stahl definía como «leyes comunes de la materia», esto es, las leyes universales que dominan el comportamiento simple, bastan, en principio, para describir exhaustivamente todo lo que hay que comprender sobre la vida. «Ya no se investiga hoy en día la vida en el laboratorio», escribía Jacob [17]. Y, en efecto, el análisis de los sistemas vivos, en estas condiciones, parece no dejar sitio al concepto de ser vivo como tal.

Por consiguiente, el biólogo encuentra al hombre y con él a todo el mundo viviente, en la misma posición de exterioridad a que le había relegado y al mismo tiempo elevado la ciencia clásica. La austeridad ascética a la cual nos invita Monod implica la misma humildad

[17] Jacob, *La logique du vivant*, París, Gallimard, 1970, pp. 320-321.

orgullosa, la misma marginalidad afectada de aquéllos que destruyeron el antiguo mundo armonioso y centrado, lanzaron la tierra al espacio infinito y encontraron en la suposición de la subjetividad extranatural el fundamento de nuevas certezas. Y nosotros, esta vez en forma de paradoja, volvemos a encontrar la misma situación del hombre respecto al mundo: ¿quién, que no sea un alma sobrenatural, puede saberse y declararse extraño al mundo? ¿Cómo puede realizarse esto por un conjunto aleatorio de átomos?

Le Hasard et la nécessité, de Jacques Monod, por tanto, puede interpretarse como un resumen de la posición ocupada por la biología en la física clásica, en un contexto en el cual la arbitariedad de las condiciones iniciales contrasta con la universalidad determinista de la leyes de evolución, y en el que la única ley de evolución macroscópica predecible y reproducible es la evolución hacia el equilibrio y la desaparición de toda actividad global. Vemos que la biología se encuentra en la misma posición analizada por Stahl. Este había visto ya que las leyes de la materia permiten comprender no ya la vida, sino la muerte; no el organismo vivo, sino la descomposición de esta organización estable, la corrupción y la putrefacción. La idea de Stahl de una acción organizadora del alma se ve reemplazada por la información genética contenida en los ácidos nucleicos y expresada en la formación de proteínas enzimáticas, verdadero conservador del azar, texto enriquecido de generación en generación por las raras mutaciones favorables.

Las enzimas, durante un breve lapso de tiempo, retrasan la muerte y traducen, en el milagro estadístico de la organización macroscópica que ellas crean, la sucesión de milagros estadísticos de los cuales son el resultado.

En el nuevo contexto de la física de los procesos irreversibles, los resultados de la biología tienen evidentemente significados e implicaciones bastante diferentes. Ciertamente, las únicas leyes macroscópicas universales son las que definen la evolución hacia el desorden, hacia los estados de equilibrio o los estados estacionarios próximos al equilibrio. Sin embargo, estas leyes físicas no proporcionan el contexto en el cual podemos insertar al ser vivo: no porque sea un ser vivo, sino porque físicamente está muy alejado de las condiciones de aplicación de estas leyes, las condiciones bajo las cuales estas leyes son pertinentes. El ser vivo se encuentra lejos del equilibrio, en un terreno en el que las consecuencias de la entropía no pueden ser interpretadas según el principio de orden de Boltzmann y en el que son

fuente de orden los procesos productores de entropía, los procesos que disipan la energía y que desempeñan un papel constructivo. En este campo, la idea de ley universal hace sitio a la de la exploración de estabilidades e inestabilidades singulares, el contraste entre el azar de las configuraciones iniciales particulares y la generalidad previsible de la evolución que ellas determinan deja paso a la coexistencia de zonas de bifurcación y de zonas de estabilidad, a la dialéctica de las fluctuaciones incontrolables y de las leyes medias deterministas.

Desde ese momento, la alternativa propuesta por Monod entre un mundo animista, que desde siempre esperaba la aparición del hombre, fin y clave de su evolución y el mundo silencioso en el que el hombre es un extraño, ya no es necesaria. El hombre, en su singularidad, no era ni llamado ni esperado por el mundo; en cambio, si comparamos la vida con un fenómeno de autoorganización de la materia en evolución hacia estados cada vez más complejos, en esas circunstancias bien determinadas, que no parecen ser una excepción, la vida es predecible en el Universo y constituye un fenómeno tan «natural» como la caída de un cuerpo.

Estamos muy lejos de poder responder a las preguntas que nos plantea este concepto del ser vivo mientras el sistema se mantiene lejos del equilibrio. Todavía hemos de formular, o reformular, estas preguntas.

Así, sabemos que la biología molecular hace remontar la explicación del origen de la vida a la unión entre proteínas y ácidos nucleicos. Pero, ¿acaso esta asociación y el propio código genético no deben incluirse en el contexto de una organización espacio-temporal global? El mantenimiento fuera del equilibrio se convierte en una cuestión esencial en lo que concierne al origen de la vida. En cambio, en lo que concierne al ser vivo como producto de una larga evolución, hay que distinguir cuidadosamente los «puntos calientes» —regímenes de transformaciones metabólicas rápidas e interacciones celulares intensas—, los «stocks», mantenidos cerca del equilibrio, y las estructuras cristalinas muertas. El ser vivo no está vivo por todas partes. Decir que se encuentra lejos del equilibrio es, cuando menos, insuficiente.

Nuestro problema, por tanto, no es reducir el ser vivo a una única definición, sino aprender a definir la «economía política» de los procesos naturales, aprender de qué forma la energía, la materia, las informaciones son acumuladas, transformadas, distribuidas. Y podemos pensar que la economía política de la naturaleza se encontrará

muy alejada de los calmos modelos de división del trabajo y de gestión armoniosa y centralizada a los que se ha asociado durante mucho tiempo la idea de organismo. Quizá, en el futuro, la proliferación, más o menos controlada de las células cancerosas o la producción de anticuerpos, reemplazarán a la antigua y tranquilizadora representación de las «funciones» del ser vivo [18].

Pero ahora debemos centrarnos en otra cuestión. Decíamos que la vida había empezado a ser algo tan «natural» como la caída de un cuerpo. ¿Qué tiene que ver la autoorganización con la caída de un cuerpo? ¿Qué nexo de unión puede existir entre la dinámica, la ciencia de las fuerzas y de las trayectorias y la ciencia de la complejidad y de la evolución, la ciencia de los procesos vivientes y del devenir natural del cual forman parte? Al final del siglo XIX se asociaba la irreversibilidad con los fenómenos de fricción, viscosidad y calentamiento. Yacía en el origen de las pérdidas y desperdicios de energía contra las cuales luchan los ingenieros. En ese caso, es posible mantener la ficción de que se trataba de un fenómeno secundario, debido a nuestra torpeza, a nuestras poco sofisticadas máquinas y que, fundamentalmente, la naturaleza era reversible, tal como lo quería la dinámica. Pero esta ficción se ha vuelto insostenible, al saber que los procesos irreversibles juegan un papel constructivo. Los procesos de la naturaleza compleja y activa, nuestra propia vida, sólo son posibles si se mantienen lejos del equilibrio por los flujos incesantes que los alimentan.

La pregunta que ya no puede eludirse es: ¿cuál es la relación entre esta nueva ciencia de la complejidad y la ciencia del comportamiento simple y elemental? ¿Cuál es la relación entre estos dos opuestos puntos de vista de la naturaleza que producen estas dos ciencias? ¿Cómo podemos nosotros combinar estos dos niveles, el nivel de lo elemental y el de lo complejo, las trayectorias y las afinidades químicas? ¿Cómo podemos encontrar la naturaleza en su unidad compleja y diversificada a partir de estas dos descripciones separadas entre sí por un abismo? ¿Qué relación podemos encontrar entre las leyes newtonianas, generales y deterministas, y la descripción teórica

[18] Así, en un bello texto de *El Anti-Edipo* (París, Minuit, 1972), G. Deleuze y F. Guattari rechazan el organismo concebido como unidad estructural (mecanismo) y como unidad individual y especifica (vitalismo), pp. 336-340. De este modo se sitúan en una perspectiva funcionalista ampliada bastante cercana a la que pueden inspirar las teorías resumidas en esta obra.

a la que hemos llegado, en donde se combinan el determinismo estadístico y el azar de las fluctuaciones incontroladas?

En cierto sentido, hemos vuelto al amanecer de la ciencia moderna, a la era en la cual Newton observaba la transformación de la materia en el crisol y analizaba la vida social de los cuerpos químicos. La primera síntesis, la síntesis newtoniana, no podía ser completa: la fuerza de interacción universal cuya acción describe la dinámica no puede explicar el comportamiento complejo e irreversible de la materia. Como en los tiempos de Newton, dos ciencias se enfrentan: la ciencia de la gravitación, que describe una naturaleza legal y atemporal, y la ciencia del fuego, la química. *Ignis mutat res.* Según este antiguo dicho, que ya hemos citado, las estructuras químicas son criaturas del fuego, el resultado de un devenir irreversible. ¿Cómo podemos franquear el abismo que separa el tiempo de los procesos complejos y el tiempo reducido a la identidad de la ley, la ciencia del devenir y la ciencia del ser, dos ciencias en abierto conflicto y, sin embargo, necesarias para dar una descripción coherente de este extraño mundo en el cual nos hallamos?

Libro III

DEL SER AL DEVENIR

Capítulo VII
EL CHOQUE DE LAS DOCTRINAS

1. *El gran logro de Boltzmann*

Whitehead escribió: «A clash of doctrines is not a disaster, it is an opportunity» [1]. Si esta afirmación es cierta, pocas oportunidades en la historia de la ciencia han sido tan prometedoras, porque el choque es masivo: se enfrentan dos mundos que, al parecer, no tienen nada en común.

¿Cómo caracterizar el Universo descrito por la dinámica clásica? Es un Universo en el que todas las transformaciones pueden reducirse básicamente al movimiento de la materia en el espacio y este movimiento está descrito en términos de trayectorias. La verdad dinámica del mundo se centra, por tanto, en el concepto de trayectoria.

Para definir una trayectoria, hemos de disponer simultáneamente de dos tipos de información: la ley general de la trayectoria, la ley que determina el paso del sistema entre dos estados instantáneos sucesivos cualesquiera y además necesitamos la descripción completa

[1] A. N. Whitehead, «Un choque de doctrinas no es un desastre, es una oportunidad», *Science and the Modern World*, p. 186.

de un estado instantáneo del sistema, cualquiera que sea. A partir de dicho estado, la aplicación de la ley permitirá a la trayectoria desplazarse de un estado a otro, tanto hacia el pasado como hacia el futuro. La ley dinámica es una ley *reversible* que describe igualmente el paso de un estado al inmediatamente precedente o al inmediatamente subsiguiente. En dinámica el pasado y el futuro juegan idéntico papel, es decir, ninguno. La definición de un estado instantáneo en términos de las posiciones de las partículas de las cuales se compone y de las velocidades de estas partículas, contiene el pasado y el futuro del sistema. Cada estado podría ser tanto el estado inicial como el final de una larga evolución. Como dijo Bergson, en cada instante todo viene dado y el cambio es meramente un desdoblamiento de una serie de estados básicamente equivalentes.

Trataremos en detalle el punto débil de esta concepción, incluyendo el sorprendente descubrimiento de que, en algunos casos, la idea de determinar las condiciones iniciales de la trayectoria ya no es compatible con las implicaciones de la propia ley dinámica. Esta es una sorpresa reciente, pues, hasta el presente, la idealización newtoniana, por ejemplo, el concepto de un Universo estático descrito en términos de trayectorias deterministas, parecía venir *impuesta* por la dinámica y estaba unida a la idea de un *nivel básico de descripción*, por lo que las transformaciones naturales, aún complejas, aparecerían en su auténtica simplicidad una vez llevadas a este nivel. Según esta concepción clásica, los procesos complejos no son intrínsecamente diferentes a simples trayectorias como las órbitas planetarias. Desde luego, el enorme número de interacciones y grados de libertad que puede poseer un sistema complejo puede conducir a dificultades prácticas que afecten a los cálculos, pero las propias leyes son universales, por ejemplo, se aplican de *la misma manera* a todos los niveles, cualesquiera que sean las masas y distancias involucradas, y son suficientes; por ejemplo, dan la explicación última de todas las transformaciones en la naturaleza.

Como veremos, a pesar del papel revolucionario que jugó la mecánica cuántica, en ella la situación es la misma. El concepto de trayectoria ha sido reemplazado por el de «paquete de ondas» (o función de onda), pero el movimiento del paquete de ondas sigue siendo reversible. De nuevo el presente implica tanto el futuro como el pasado.

Es difícil imaginar un mayor contraste con el mundo descrito por medio de los conceptos derivados del orden por las fluctuaciones (ver

capítulo VI). ¿Cómo comparar trayectorias dinámicas a procesos que transforman la materia, por ejemplo, reacciones químicas, convección, desintegración radiactiva? ¿Cómo reconciliar la reversibilidad de las leyes dinámicas con la irreversibilidad del aumento de entropía producido en estos procesos? Es cierto que las leyes termodinámicas aún expresan cierta «universalidad» de comportamiento en las proximidades del equilibrio: todos los sistemas termodinámicos están sujetos a la misma evolución monótona hacia el equilibrio o hacia un estado estacionario cercano al equilibrio. Más allá del umbral de estabilidad, sin embargo, el concepto de leyes universales se ve reemplazado por la exploración de comportamientos cualitativamente distintos que dependen no solamente de los mecanismos involucrados, sino también del pasado del sistema. No es posible afirmar que, en cada instante, «todo viene dado», precisamente porque la definición del estado en el cual se encuentran dichos sistemas ya no puede ser puramente *instantánea*, sino que ha de tener en cuenta las sucesivas bifurcaciones encontradas en el pasado. El determinismo da lugar a una dialéctica compleja entre el azar y necesidad, a la distinción de *regiones de inestabilidad* y de regiones estables entre bifurcaciones donde prevalecen leyes deterministas. El orden por las fluctuaciones rechaza el Universo estático de la dinámica en favor de un mundo abierto en el cual la actividad crea la novedad, la evolución es innovación, creación y destrucción, nacimiento y muerte.

Con el enunciado de Clausius del segundo principio, el choque entre termodinámica y dinámica se hizo bastante patente. Clausius y después Maxwell [2], introducirán en la descripción física el concepto de colisión y, con ello, la posibilidad de una descripción estadística. Podemos *contar* las colisiones ya que son sucesos *discretos*, y estimar su frecuencia promedio. También podemos clasificar las colisiones, por ejemplo, distinguir entre colisiones que producen una partícula con velocidad determinada v y las que destruyen una partícula con velocidad v y producen una molécula con diferente velocidad.

La cuestión planteada por Maxwell era si cabía la posibilidad de

[2] Ver a propósito S. Brush, *The Kind of Motion we Call Heat,* libro I, *Physics and the Atomists;* libro II, *Statistical Physics and Irreversible Processes,* Amsterdam, North Holland Pub. Comp., 1976, así como su antología comentada, *Kinetic Theory:* vol. I, *The Nature of Gases and Heat* y el volumen II, *Irreversible Processes,* Oxford, Pergamon, 1965 y 1966, y Gillipsie, C., «Intellectual factors in the Background of Analysis and probability», en *Scientific Change,* ed. Gombie, A., Nueva York, Basic Books, 1963.

definir un estado de un gas tal que las colisiones que incesantemente modifican las velocidades de las moléculas ya no determinen ninguna evolución en la *distribución* de dichas velocidades, por ejemplo, en el número medio de partículas para cada valor de la velocidad. ¿Cuál es la distribución de velocidades tal que los efectos de las colisiones sobre cada molécula se compensan unos a otros en promedio?

Maxwell demostró que este estado particular, que es un estado de equilibrio termodinámico, tiene lugar cuando la distribución de velocidades corresponde a la conocida «curva acampanada», la misma curva que, en los trabajos de Laplace, Gauss y Quételet aparece como la propia expresión del azar.

La teoría de Maxwell permite comprender de manera simple las leyes termodinámicas que describen el comportamiento de los gases en el equilibrio. Un aumento de la temperatura corresponde a un aumento de la velocidad media de las moléculas y, por tanto, de la energía asociada a su movimiento. Las leyes clásicas físico-químicas son directamente deducibles de esta hipótesis y, en particular, la relación entre la temperatura de un gas y la presión que ejerce sobre las paredes que lo contienen. La distribución de las velocidades de Maxwell ha sido verificada experimentalmente con gran precisión. Todavía constituye la base para la solución de numerosos problemas de química física (por ejemplo el cálculo del número de colisiones en una mezcla reactiva).

Boltzmann, sin embargo, quiso ir más lejos. Quiso describir no sólo el *estado* de equilibrio, sino también la *evolución* hacia el equilibrio, por ejemplo, la evolución hacia la distribución maxwelliana. Quiso descubrir los mecanismos moleculares que llevan al aumento de la entropía y a la evolución del sistema desde una función de distribución de las velocidades iniciales cualquiera hasta el estado final, el estado de equilibrio.

Característicamente, Boltzmann enfocó la cuestión de la evolución física no en el nivel de las trayectorias individuales, sino en el de la *población* de moléculas. Para Boltzmann esto era virtualmente equivalente a llevar a cabo la hazaña de Darwin en el campo de la física: la fuerza motriz detrás de la evolución biológica, por ejemplo, la selección natural, no puede ser tampoco definida para un solo individuo, sino únicamente para una población numerosa. Es, por consiguiente, un concepto estadístico [3].

---

[3] Como recalca Elkana («Boltzmann's Scientific Research program and its Alter-

Sin entrar en detalles técnicos, los resultados de Boltzmann pueden ser descritos en términos simples. La evolución de la función de distribución $f(r, v, t)$ de las velocidades v en un punto r y un tiempo t aparece como la suma de dos efectos; el número de partículas en un tiempo dado t que tienen una velocidad v varía, por una parte, en función del movimiento continuo de las partículas consideradas como independientes (efecto denotado como $[\partial f(v, t)/\partial t]_{tray}$) y, por otra parte, como resultado de las colisiones entre las partículas (efecto denotado por $[\partial f(t, v)/\partial t]_{col}$). El primer efecto puede ser calculado fácilmente en términos de la dinámica. Es en el estudio del segundo efecto, debido a las colisiones, donde yace la originalidad del método de Boltzmann. Frente a las dificultades involucradas en seguir las trayectorias, Boltzmann usó conceptos similares a los delineados en el capítulo V en conexión con las reacciones químicas y calculó el número *promedio* de colisiones que crean o destruyen una molécula correspondiente a la velocidad v.

También en este caso hay dos procesos de efectos opuestos: colisiones directas, es decir, aquellas que producen una molécula con velocidad v a partir de dos moléculas con velocidades v' y v'', y colisiones inversas, en las cuales una molécula con velocidad v se destruye por colisión con una molécula con velocidad v_1. Como en el caso de las reacciones químicas (capítulo V, sección 1), la frecuencia de tales sucesos se considera proporcional al producto de los números de moléculas que intervienen en estos procesos. Desde luego, históricamente hablando, el método de Boltzmann (1872) precedió al de la cinética química.

El término de colisión de Boltzmann, la variación instantánea del número de moléculas de velocidad v como resultado de la colisión, se obtiene sumando todos los procesos que producen o destruyen una partícula con velocidad v. Los detalles importan poco, pero es esencial observar que las propiedades de simetría de este término $[\partial f(v, t)/\partial t]_{col.}$ difieren de las del término «continuo» $[\partial f(v, t)/\partial t]_{tray.}$ Este último posee la simetría clásica de las ecuaciones dinámicas: la

natives», en *Interaction between Science and Philosophy*, Atlantic, Highlands, New Jersey, Humanity Press, 1974) la idea darwiniana de la evolución se expresa explícitamente sobre todo en la visión de Boltzmann del conocimiento científico y en su defensa de los modelos mecanicistas contra los energetistas. Ver, por ejemplo, su conferencia de 1886, en «The second law of Thermodynamics», en *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, B. McGuinnes, ed. Dordrecht-Holland, Reidel, 1974.

inversión de las velocidades obliga al sistema a «ir hacia atrás en el tiempo». Por el contrario, después de la inversión, las colisiones continúan, como antes de la inversión, empujando al sistema hacia el equilibrio. La evaluación estadística de su balance, $[\partial f(v, t)/\partial t]_{col.}$ permanece inalterable. La contribución de la ecuación de Boltzmann determinada por las colisiones permanece *invariante con respecto a la inversión de la velocidad.*

La simetría del término de colisiones corresponde, por tanto, a una propiedad ajena a la dinámica. La ecuación de Boltzmann contiene una contribución que posee la simetría normal de las ecuaciones dinámicas ($v \rightarrow -v$ equivalente a $t \rightarrow -t$), así como una contribución que lleva al sistema al equilibrio incluso cuando se produce la inversión de la velocidad.

No es tarea fácil integrar la ecuación cinética de Boltzmann. Es una ecuación no lineal, puesto que la función de distribución de la velocidas $f(r, v, t)$, que es desconocida, aparece en forma no lineal en el término de colisiones.

Pero el resultado fundamental de Boltzmann se obtiene con ayuda de las propiedades generales de su ecuación, sin que sea necesario revolverla. De hecho, Boltzmann demostró que una consecuencia realmente notable de la simetría de su ecuación es que una integral efectuada sobre la función de distribución y, más exactamente, la magnitud $\mathcal{H} = \int f(v, t) \log f(v, t) dv$ no podía más que *disminuir* con el tiempo hasta alcanzar un mínimo en el instante en que f corresponde a la distribución maxwelliana de equilibrio. Esto era, pues, para Boltzmann, la clave para la interpretación macroscópica de la entropía. ¡Se había establecido un principio de evolución molecular! Es fácil entender la fascinación que este descubrimiento ejerció sobre todas las generaciones de físicos que siguieron a Boltzmann, incluidos Planck, Einstein y Shrödinger [4].

Boltzmann supuso que la relación entre la entropía y su recién descubierta magnitud H era $\mathcal{H} = -k\mathcal{H}$, donde k es, una vez más (ver capítulo IV, sección 4) la constante universal de Boltzmann. Tam-

[4] En su *Autobiografía científica,* Planck describe su cambiante relación con Boltzmann (que al principio se mostraba hostil a la distinción fenomenológica introducida por Planck entre procesos reversibles e irreversibles). Ver también Y. Elkana, *op. cit.*, y S. Brush, *Statistical Physics and Irreversible processes,* pp. 640-651; Einstein, *loc. cit.*, pp. 672-674; sobre Schrödinger, E. Schrödinger, *Science, theory and Man,* Nueva York, Dover, 1957.

bién se hizo mención de la igualmente bien conocida ecuación, debida asimismo a Boltzmann, $S=K \log P$, que relaciona la entropía con el número de complexiones. Sin embargo, la nueva fórmula va mucho más allá, puesto que relaciona la entropía en la función f cuyo valor puede ser calculado en cualquier instante haciendo uso de la ecuación cinética de Boltzmann.

Hay un punto que merece ser subrayado. La fórmula $\mathcal{H} = \int f \log f dv$ no depende del supuesto mecanismo de interacción entre moléculas. El modelo de la colisión entre esferas duras y el que hace de las moléculas centros de atracción llegan a *la misma formulación*. Se trata de la definición de *atractor universal*. En cuanto que la ecuación cinética refleja la particularidad de los modelos a través de las fuerzas intermoleculares que definen el tipo de interacción, todo rastro de hipótesis dinámica sobre las interacciones desaparece en la definición de $\mathcal{H}$. Esta no depende más que de la función de distribución de velocidades. Desde que se conoce $\mathcal{H}$, se conoce cuánto se aleja el estado atractor del estado de equilibrio de un sistema.

En años recientes ha habido numerosas verificaciones numéricas del decrecimiento monótono de $\mathcal{H}$ en el tiempo. Todas han confirmado la predicción de Boltzmann. Incluso hoy en día su ecuación cinética juega un papel importante en la física de los gases. Por medio de su solución, los coeficientes de transporte, tales como los que caracterizan la conductividad térmica o la difusión, pueden ser calculados y presentan un buen acuerdo con los datos experimentales.

Sin embargo, es desde el punto de vista conceptual que el logro de Boltzmann es enorme: la distinción entre fenómenos reversibles e irreversibles, lo cual, como hemos visto, subyace en el segundo principio, se traspone ahora al nivel microscópico. El término $(\partial f/\partial t)_{\text{trayectorias}}$ corresponde a la parte reversible de la evolución, mientras que la parte $(\partial f/\partial t)_{\text{colisiones}}$ corresponde a la irreversible.

El logro de Boltzmann fue así un paso decisivo hacia una física de los *procesos;* su alcance es comparable al de la dinámica. ¿Podemos de aquí concluir que el problema de la irreversibilidad ha sido resuelto, que la teoría de Boltzmann realiza una derivación del segundo principio a partir de la dinámica? ¿Se ha reducido la entropía a la dinámica? La respuesta a estas preguntas es clara: ciertamente, no.

2. *Dinámica y termodinámica: dos mundos separados*

Tan pronto como se publicó el trabajo de Boltzmann en 1872, surgieron objeciones a la conclusión de que su método deducía la irreversibilidad a partir de la dinámica. Examinemos dos de estas objeciones, una hecha por Poincaré [5], la otra por Loschmidt [6].

La objeción de Poincaré se basa en la cuestión de la simetría de la ecuación de Boltzmann anteriormente mencionada. Ningún razonamiento correcto puede llevar jamás a conclusiones que contradigan sus premisas. Sin embargo, según hemos visto, las propiedades de simetría de la ecuación cinética, obtenida por Boltzmann para la función de distribución, contradicen las de la dinámica. Boltzmann no puede, por consiguiente, haber deducido la entropía a partir de la dinámica. Necesariamente ha de haber introducido algo nuevo, algo ajeno a la dinámica. Sus resultados pueden, por tanto, representarnos solamente un modelo fenomenológico que, si bien es útil, no tiene relación directa con la dinámica.

Poincaré adoptó una postura absolutamente firme; investigó en un corto artículo la posibilidad de construir una función M de las posiciones y los momentos, $M(p, q)$, que tuviera las propiedades de la entropía (o más bien de la función $\mathcal{H}$). Dicha cantidad habría de ser positiva, constante o monótonamente decreciente con el tiempo. Su conclusión fue negativa; no existe una función de estas características dentro del marco de la dinámica *hamiltoniana*. ¡Lo cual no es una sorpresa! ¿Cómo podrían las leyes reversibles de la dinámica producir, en modo alguno, una evolución irreversible? Poincaré termina sus conocidas «Lecciones de Termodinámica» con una nota de desaliento; sin duda, era necesario hacer uso de otras consideraciones, utilizar el cálculo de probabilidades. Pero ¿cómo podría, a su vez, justificarse la utilización de este concepto ajeno a la dinámica?

La objeción de Loschmidt, por otra parte, permite determinar los *límites de validez* del modelo cinético de Boltzmann. De hecho, Loschmidt observó que este modelo no puede ser válido tras una inversión de la dirección de las velocidades correspondientes a $v \to -v$. En términos de la *dinámica*, no hay salida posible; las colisiones que

[5] H. Poincaré, «La mecánique et l'expérience», en *Revue de Metaphysique et de Morale*, vol. 1, 1893, pp. 534-537.

[6] Ver S. Brush, *loc. cit.*, y las observaciones de Planck en su biografía (Loschmidt fue alumno de Planck).

tienen lugar en dirección opuesta «deshacen» lo que fue previamente hecho y el sistema ha de retornar a su estado inicial. Por consiguiente, la función $\mathcal{H}$ debe también aumentar hasta alcanzar de nuevo su valor inicial. La inversión de la velocidad requiere, pues, una evolución *anti-termodinámica* y, en efecto, la simulación computacional confirma, de manera definitiva, *el incremento de* $\mathcal{H}$ tras la inversión de la velocidad. Se ha de admitir que el modelo de Boltzmann no es válido para ciertas condiciones iniciales, por ejemplo las resultantes de una inversión de la velocidad. En contradicción con el modelo cinético, estas condiciones llevan a una evolución en la cual $\mathcal{H}$ aumenta. Pero ¿a qué sistemas puede aplicarse el razonamiento de Boltzmann y a cuáles no?

Una vez planteado este problema, es una tarea fácil identificar la naturaleza de la limitación impuesta al modelo de Boltzmann. Este modelo se basa, en efecto, en una hipótesis estadística que permite que se evalúe el número medio de colisiones, por ejemplo, «el caos molecular». En esta hipótesis se considera implícitamente que *antes* de las colisiones las moléculas se comportan independientemente unas de otras, lo que equivale a decir que no existe correlación entre sus velocidades [7]. Ahora bien, si se hace al sistema «ir hacia atrás en el tiempo», se crea una nueva situación anómala, en el sentido de que se «destina» a ciertas moléculas a encontrarse en un instante predeterminado y a sufrir un cambio predeterminado de velocidad. No importa lo lejos que se encuentren estas moléculas en el momento de la inversión de la velocidad, esta operación establece correlaciones entre las moléculas. Ya no son, por tanto, independientes. La hipótesis del caos molecular no puede ser aplicada a un sistema que haya sufrido una inversión de la velocidad.

La inversión de la velocidad crea un sistema *altamente organizado* con un comportamiento aparentemente intencionado. El efecto de las distintas colisiones es, como por una armonía preestablecida, producir un conjunto, una evolución «anti-termodinámica» (por ejemplo, la separación espontánea de las moléculas lentas y rápidas si, en el instante inicial, el sistema ha sido preparado colocando en contacto dos gases a distintas temperaturas). Sin embargo, admitir la posible existencia de tales evoluciones anti-termodinámicas, si bien raras o incluso excepcionales (tan excepcionales como las condiciones iniciales que surgen de la inversión de la velocidad), significa cuestionar

[7] S. Brush, *loc. cit.*, pp. 616-625.

la propia generalidad del segundo principio; habría casos en los que, empezando con condiciones iniciales adecuadas, podría tener lugar, espontáneamente, una separación de temperaturas. Tendríamos que definir las circunstancais bajo las cuales los procesos irreversibles podrían hacerse reversibles e incluso compensar un proceso irreversible que hubiera tenido lugar anteriormente. El principio deja de ser un principio para convertirse en una generalización de corto alcance.

Tal conclusión no puede ser descartada *a priori.* Hoy en día no podemos saber realmente si el segundo principio es compatible con todos los tipos conocidos de interacciones entre partículas, en especial con la interacción gravitatoria. No sabemos si, como creía Clausius, la entropía del Universo realmente aumenta o si este aumento está restringido a situaciones gravitacionales dadas. Sin embargo, en el caso de las fuerzas de corto alcance correspondientes a las interacciones moleculares, no tenemos ninguna razón, por ahora, para expresar dudas acerca de la validez del segundo principio. Por consiguiente, parece importante reconsiderar los argumentos de Boltzmann y tratar de eliminar su concepto «fenomenológico». El problema es especialmente agudo cuando consideramos el término de colisiones, introducido por Boltzmann, en base a consideraciones ajenas a la dinámica, es decir, invocando la hipótesis del caos molecular.

Como la irreversibilidad ciertamente no puede existir a nivel de trayectorias aisladas, debemos primero combinar las ideas de «población» de grupos de trayectorias con las ideas de la dinámica de forma más satisfactoria. Este fue precisamente el objeto de la teoría de Gibbs y Einstein que describiremos a continuación.

3. *Los colectivos de Gibbs*

La descripción dinámica de un sistema macroscópico compuesto de cerca de 10^{23} moléculas plantea un problema desde el comienzo: no podemos en manera alguna determinar las posiciones iniciales y velocidades de 10^{23} moléculas. Por tanto, es bastante notable que la teoría de los colectivos propuesta por Gibbs y Einstein introdujera una descripción dinámica *independiente* de la especificación precisa de las condiciones iniciales.

La teoría de los colectivos representa los sistemas dinámicos en el «espacio de fases». El estado instantáneo de un sistema compues-

to, por ejemplo, de *n* partículas independientes, puede ser representado por *n* puntos y *n* vectores de velocidad en un espacio de *tres* dimensiones. También puede ser representado por *un solo punto* en un espacio de *6n* dimensiones. Su evolución en el tiempo será entonces descrita por una trayectoria en este espacio llamado «espacio de fases». A cada sistema dinámico le corresponde un espacio de fases tal que cada estado del sistema pueda ser representado por un punto y sólo uno.

Ya se ha dicho que las condiciones iniciales exactas de un sistema macroscópico no son nunca conocidas. Sin embargo, nada nos prohíbe que *representemos* este sistema por un «colectivo» de puntos, a saber, los puntos correspondientes a los diferentes estados dinámicos compatibles con la información que tenemos del sistema. Cada región del espacio de fases contiene un número de puntos representativos que miden la posibilidad de encontrar realmente el sistema en esta región. En lugar de utilizar puntos separados, es más conveniente introducir una *densidad continua* de puntos representativos en el espacio de fases. Llamaremos $\varrho(q_1 \ldots q_{3N}; p_1 \ldots p_{3N})$ a esta densidad en el espacio de fases. Esta densidad mide la probabilidad de encontrar un sistema dinámico alrededor del punto $[q_1 \ldots q_{3N}; p_1 \ldots p_{3N}]$ en el espacio de fases.

Así representada, la función de densidad podría parecer una construcción artificial, mientras que la trayectoria correspondería «directamente» a la descripción del comportamiento «natural». Pero de hecho, es la trayectoria y no la densidad lo que corresponde a una idealización. En efecto, no conocemos nunca un estado inicial con el grado infinito de precisión que haría falta para reducirlo a un punto único en el espacio de fases; así, nunca podemos definir la trayectoria única que parte de este punto inicial único; solamente podemos determinar un colectivo de trayectorias que comienzan en el colectivo de puntos representativos correspondientes a lo que sabemos del estado inicial del sistema. Es la función de densidad ϱ la que representa nuestro conocimiento del sistema y cuanto más preciso sea este conocimiento menor será la región del espacio de fases en la que la función de densidad es distinta de cero y en la que se puede encontrar el sistema. En el caso opuesto, cuando la función de densidad ϱ adopta en todo el espacio de fases un valor uniforme, no conocemos nada del sistema.

Desde este punto de vista, una trayectoria representa el máximo conocimiento que podemos tener acerca de un sistema. Es el resul-

tado de un proceso del paso al límite, el resultado de la precisión creciente de nuestro conocimiento.

Como veremos, nuestro problema fundamental será determinar cuándo tal paso al límite es realmente posible, cuándo tiene algún sentido la idea de «acotar» un sistema por aproximaciones sucesivas. A medida que afinamos la precisión de las medidas, pasamos de una región dada del espacio de fases donde P es no nulo a una región más pequeña, dentro de la primera, y así hasta que la región que contiene el sistema tienda a cero. Una medida que siempre es de precisión finita, nunca permitirá pasar de una región tan pequeña como se quiera a un *punto*, excepto por idealización. El hecho de que la idealización, del paso al límite y, por tanto, de la trayectoria no sean siempre posibles, constituye la base de la renovación contemporánea de la dinámica.

La introducción de la teoría de los colectivos por Gibbs y Einstein fue una continuación natural del esfuerzo de Boltzmann. En esta perspectiva la función de densidad ρ en el espacio de fases reemplaza a la función f usada por Boltzmann. Sin embargo, el contenido físico de ρ sobrepasa al de f. Al igual que f, la función de densidad ρ determina la distribución de velocidad, pero también contiene otra información, como la probabilidad de encontrar dos partículas separadas por una cierta distancia o la correlación entre partículas.

Debemos ahora describr la ecuación de evolución de la función de densidad. A primera vista, esto parece ser una tarea aún más ambiciosa que la que Boltzmann se impuso para la función de distribución de la velocidad. Sin embargo, no es así. Las ecuaciones hamiltonianas discutidas en el capítulo II nos permiten obtener una ecuación de evolución exacta para ρ, sin hacer ninguna otra aproximación. Esta es la denominada ecuación de Liouville, a la que volveremos en el capítulo IX. Aquí queremos señalar únicamente que la evolución de la función de densidad ρ en el espacio de fases tiene lugar como en un *fluido incompresible*. Una vez que el punto representado ocupa un volumen V en el espacio de fases, este volumen permanece *constante* en el tiempo. La forma del volumen puede deformarse de forma arbitraria, pero el valor del volumen permanece constante (ver capítulo IX, figura 15, p. 273-274).

La teoría de Gibbs de los colectivos nos permite una combinación rigurosa del punto de vista estadístico (el estudio de la «población» descrita por ρ) con las leyes de la dinámica. También facilita una representación más precisa del estado de equilibrio termodiná-

mico. Así, en el caso de un sistema aislado, el colectivo de puntos representativos corresponde a sistemas que tienen todos la misma energía E. La densidad ϱ diferirá de cero únicamente en la llamada «superficie microcanónica» correspondiente a este valor de la energía en el espacio de fases, tal que $H(q_1 \ldots q_{3N}; p_1 \ldots p_{3N})=E$.

Inicialmente, la densidad puede distribuirse de forma arbitraria sobre esta superficie. En el equilibrio, es necesario que ϱ, que permite calcular los valores medios correspondientes a las magnitudes macroscópicas que el equilibrio define como constantes, no varíe en el tiempo y sea independiente del estado inicial específico; la función de distribución ϱ se hace uniforme sobre la superficie microcanónica. Cada punto sobre esta superficie tiene, pues, igual probabilidad de representar realmente al sistema.

Se habla, pues, de *colectivo microcanónico* caracterizado por un valor de ϱ constante sobre la superficie $H=E$ y de valor cero en las demás partes. Gibbs mostró que a partir de la densidad de un colectivo microcanónico era posible encontrar todas las propiedades de los sistemas termodinámicos aislados en el equilibrio.

¿Nos acerca la teoría de los colectivos a la solución del problema de la irreversibilidad? La teoría de Boltzmann condujo a la expresión del atractor termodinámico, la entropía, en términos de la función de distribución de velocidades f. Logró este resultado introduciendo la magnitud $\mathcal{H}$, la cual, según vimos, evoluciona en el tiempo hasta que se alcanza la distribución maxwelliana y, durante esta evolución, $\mathcal{H}$ decrece monótonamente. ¿Podemos ahora, de manera más general, tomar la evolución hacia el colectivo microcanónico de la función de distribución ϱ en el espacio de fases como base del aumento de la entropía? ¿Bastará con reemplazar la cantidad $\mathcal{H}$ por una cantidad $\mathcal{H}_G$ «gibbsiana» definida exactamente igual pero en términos de ϱ, $\mathcal{H}_G=\int \varrho / n\varrho$ dp dq?

Desafortunadamente, la respuesta a ambas cuestiones es «no»; si utilizamos la ecuación de Liouville con su conservación del volumen del espacio de fases, la conclusión es inmediata: *$\mathcal{H}_G$ es una constante* y, por tanto, no puede representar la entropía. ¡En lugar de avanzar, hemos retrocedido con respecto a Boltzmann!

Retrospectivamente, ¿hay alguna razón para sorprenderse de este fracaso? La teoría de los colectivos de Gibbs introduce únicamente un solo elemento adicional, aunque muy importante, con respecto a la dinámica, a saber, nuestra ignorancia de las condiciones iniciales. ¿Es esta ignorancia suficiente para llevarnos al concepto de irrever-

sibilidad? ¿Deben satisfacer todos los sistemas dinámicos el segundo principio meramente porque no conocemos sus condiciones iniciales? Ligar la irreversibilidad a nuestro conocimiento en lugar de basarla en alguna propiedad física relacionada con la dinámica nos conduce a una interpretación subjetiva de la irreversibilidad que ahora vamos a discutir.

4. *La interpretación subjetiva de la irreversibilidad*

El propio Gibbs, al parecer, pensaba que había que abandonar toda esperanza de encontrar una solución «objetiva» al problema de la irreversibilidad y que debíamos resignarnos con una interpretación subjetiva basada, no en propiedades físicas intrínsecas, sino en el conocimiento o ignorancia del observador. Además, sugirió un ejemplo pictórico: mezclamos una gota de tinta con agua pura. El agua rápidamente se vuelve gris. Este proceso es considerado como un ejemplo típico de proceso irreversible. Sin embargo, para un observador con sentidos lo suficientemente desarrollados para poder percibir no sólo el líquido macroscópico, sino también cada una de sus moléculas, el líquido nunca se volvería gris. El observador podría seguir las trayectorias cada vez más deslocalizadas de las «moléculas de tinta», que inicialmente se encontraban concentradas en una pequeña región del sistema. La idea de que el medio heterogéneo se ha hecho irreversiblemente homogéneo, es decir, que el agua «se ha vuelto gris» sería, bajo este punto de vista, una ilusión debida a la falta de precisión de nuestros instrumentos de observación. Nuestro observador vería únicamente movimientos reversibles, nada de gris, sólo «blanco» y «negro». Si describe la evolución dinámica en el marco de la teoría de los colectivos, observará la creciente distorsión y ramificación en el espacio de fases de la celda que contenía los puntos representativos iniciales de la tinta; pero, para él, el volumen de esta celda permanecerá invariante durante la evolución (evolución de Liouville), mientras que para nosotros este volumen parece haber crecido hasta abarcar todo el sistema (evolución irreversible).

De esta manera, el aumento de la entropía no describe el propio sistema, sino solamente nuestro conocimiento de él. Lo que aumenta constantemente es nuestra ignorancia del estado del sistema, de la región del espacio de fases donde será posible encontrar los puntos que lo representan. En el instante inicial podemos disponer de muchos da-

tos acerca de un sistema y localizarlo con bastante precisión en una región limitada del espacio de fases, pero, según pasa el tiempo, los puntos compatibles con las condiciones iniciales pueden dar lugar a trayectorias que se alejan más y más de la región inicial. La información relacionada con la preparación inicial pierde así irreversiblemente su relevancia hasta que todo lo que se conoce del sistema son las cantidades que han permanecido invariantes con respecto a la evolución dinámica. El sistema ahora está en equilibrio y puede encontrarse en cualquier punto de la superficie microcanónica. El aumento de entropía es, por tanto, indicativo de la ruptura de la información disponible. El sistema se encuentra inicialmente tanto más alejado del equilibrio cuanto más sabemos acerca de él, cuanto más precisamente podemos definirlo y menor sea la región del espacio de fase en la cual podemos situarlo [8].

Por consiguiente, en esta interpretación subjetiva de la irreversibilidad como crecimiento de la ignorancia (aún más reforzada por la ambigua analogía con la teoría de la información) es el observador quien es responsable de la asimetría temporal que caracteriza el devenir del sistema. Puesto que el observador no puede, de un simple vistazo, determinar las posiciones y velocidades de todas las partículas que componen un sistema complejo, no puede tener acceso a la verdad fundamental de este sistema, no puede conocer el estado instantáneo que, simultáneamente, contiene su pasado y su futuro, ni captar la ley reversible que le permitiría predecir su evolución de un instante al siguiente. Tampoco puede manipular el sistema como el diablillo inventado por Maxwell, que es capaz de separar partículas rápidas y lentas y de imponer al sistema una evolución anti-termodinámica que conduzca a una distribución de temperatura cada vez menos uniforme [9].

La termodinámica es, sin ninguna duda, la ciencia de los sistemas complejos pero, en esta interpretación, la única característica específica de los sistemas complejos es que lo que de ellos sabemos es li-

[8] Ver, por ejemplo, E. T. Jaynes, «Gibbs Vs Boltzmann Entropies», en *American Journal of Physics*, vol. 33, 1965, pp. 391-398.

[9] El diablillo de Maxwell aparece en Maxwell, J. C., *Theory of Heat*, capítulo XXII, Londres, Longmans, 1871; sobre este tema véase también Daub, E. E., «Maxwell's Demon», en *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. I, 1970, pp. 213-227, y en el mismo volumen, dedicado a Maxwell, Heimann, P., «Molecular Forces, Statistical Representation and Maxwell's Demon», pp. 189-211.

mitado y que nuestra incertidumbre aumenta con el tiempo. En lugar de reconocer en la irreversibilidad algo que enlaza la naturaleza al observador, éste se ve obligado a admitir que la naturaleza simplemente le devuelve la imagen reflejada de su propia ignorancia. La naturaleza es silenciosa; la irreversibilidad, el devenir, lejos de enraizarnos en el mundo físico, es simplemente el eco del intento humano y de sus límites.

Sin embargo, se puede plantear una objeción inmediata. Según esta interpretación, la termodinámica debería ser tan universal como nuestra ignorancia; los *únicos* procesos que deberían existir son los irreversibles. Este es el obstáculo donde tropiezan tales experimentos universales de la entropía basados en nuestra ignorancia de las condiciones iniciales (o de contorno), ya que la irreversibilidad *no es una propiedad universal.* Para enlazar la dinámica y la termodinámica debemos introducir un criterio físico de diferenciación entre los sistemas, según el cual éstos puedan o no ser descritos termodinámicamente. La complejidad debe definirse en términos físicos y no en términos de falta de conocimiento. Este es el problema que trataremos en el capítulo IX, en el cual encontraremos las mismas cuestiones de observación e ignorancia, aunque ahora asociadas con las propiedades específicas de los sistemas estudiados.

¿Por qué algunos científicos han aceptado de tan buen grado la interpretación subjetiva? Quizá parte de su seducción retórica yace en el hecho de que, en un comienzo, según hemos visto, el aumento irreversible de la entropía estaba asociado con la idea de la manipulación imperfecta, de la falta de control sobre operaciones que idealmente deberían ser reversibles al cuidado del desperdicio y la pérdida de rendimiento que de ello resultan.

Sin embargo, esta interpretación se convierte en absurda tan pronto como se dejan de lado las asociaciones irrelevantes con problemas tecnológicos. Hemos de recordar el contexto que dio al segundo principio su significación de flecha del tiempo de la naturaleza. ¡La afinidad química, la conducción calorífica, la viscosidad y todas las propiedades asociadas a la producción irreversible de entropía dependerían, de esta manera, del observador! La combustión que tiene lugar en el horno, ¿no se debería al aumento de nuestra ignorancia? [10].

[10] En *Différence et répétition* (París, P.U.F., 1972, pp. 288-314), Gilles Deleuze muestra la alianza ciencia-sentido común-filosofía que ha prevalecido, mientras que el segundo principio ha permanecido como principio general, que explica todo pero no

Los químicos antiguos evocaron el carácter específico de las propiedades térmicas y químicas de la materia para protestar contra el imperialismo de la mecánica, abstracta y general, y *precisamente* a estas propiedades se les negó todo carácter objetivo, se les negó que estuvieran intrínsecamente ligadas a la materia, se pretendió que estuvieran determinadas por el carácter aproximativo de nuestro conocimiento.

El absurdo se hace aún mayor desde el momento en que se establecen los límites del principio de orden de Boltzmann en termodinámica. Se trataba de contar el número de complexiones; por tanto, el segundo principio tan sólo podía establecer la diferencia entre las evoluciones predecibles y reproducibles hacia la más probable, y todas las demás, improbables pero compatibles con las leyes de la física. Este papel de «principio regulador», que no explica nada, pero que define los tipos de posibilidad, tentaba a identificar la descripción termodinámica con un conjunto de fórmulas de manipulación y previsión y de desdeñar totalmente lo procesos irreversibles que explican el comportamiento del sistema [10]. Por el contrario, al plantearse el problema de la estabilidad, al *no* excluirse más que una fluctuación en lugar de disminuir se amplifica la actividad irreversible, se convierte en constructiva, el sistema adquiere una autonomía definida por los diferentes modos que puede adoptar su actividad para el mismo conjunto de condiciones del entorno. Y es la descripción de esta actividad, y no la manipulación y la explotación del sistema, lo que ahora constituye el problema de la termodinámica.

Más aún, puesto que los fenómenos de organización originados por la irreversibilidad juegan un importante papel en biología, se hace imposible considerarlos como simples apariencias debidas únicamente a nuestra ignorancia: ¿somos nosotros mismos, por ejemplo, criaturas vivas capaces de observar y de manipular, simples ficciones producidas por nuestros imperfectos sentidos?

De esta manera los crecientes desarrollos de la teoría termodinámica han aumentado la violencia del choque entre la dinámica y la termodinámica. El intento de reducir la peculiaridad de la termodi-

---

da cuenta de nada. La versión de Nietzsche del energismo que él presenta, constituía un punto de vista coherente, *en el marco de la termodinámica del equilibrio* (que no necesita la irreversibilidad más que para garantizar la estabilidad de los estados de equilibrio).

námica a aproximaciones debidas a nuestro conocimiento imperfecto parece fuera de toda proporción tan pronto como se comprende el papel constructivo de la entropía; y se descubre la posibilidad de amplificación de las fluctuaciones. Recíprocamente, es difícil rechazar la dinámica en nombre de la irreversibilidad: el movimiento planetario es conservativo y no sufre cambio; el movimiento pendular no manifiesta creatividad alguna y su oscilación constituye una aproximación de un movimiento eterno que prevé la dinámica de un mundo sin rozamiento. Hay aparentemente dos mundos en conflicto, un mundo de trayectorias y un mundo de procesos y no hay forma de negar uno afirmando otro.

Es interesante observar cómo, en cierto grado, existe una analogía entre esta situación y la que dio lugar al surgimiento del materialismo dialéctico. El desarrollo contemporáneo de la física, el descubrimiento del papel constructivo juzgado por la irreversibilidad, han planteado una cuestión dentro de las ciencias de la naturaleza que hacía tiempo había surgido entre aquellos para quienes comprender la naturaleza quiere decir comprenderla como capaz de producir al hombre y a sus sociedades. Hemos descrito una naturaleza que puede ser denominada «histórica», por ejemplo, capaz de desarrollo e innovación. Es interesante que la idea de una historia de la naturaleza como parte integrante de la visión materialista había sido sostenida hacía tiempo por Marx; con mayor detalle, por Engels.

Cuando Engels escribió su *Dialéctica de la Naturaleza*, las ciencias físicas parecían haberse librado de la visión mecanicista del mundo y haberse acercado a la idea de un desarrollo histórico de la naturaleza. Engels menciona tres descubrimientos fundamentales: la energía y las leyes que gobiernan sus transformaciones cualitativas; la célula, constituyente básico de los seres vivos, y el descubrimiento por Darwin de la evolución de las especies. A la vista de estos grandes descubrimientos, Engels llegó a la conclusión de que el mecanicismo había muerto y que nada se opone a investigar en la historia de la naturaleza y de las sociedades humanas las leyes generales del desarrollo histórico: las leyes dialécticas.

Hoy en día sabemos que los descubrimientos de las ciencias de la naturaleza en el siglo XIX no bastaron para transformar los principios de esas ciencias. No es que la ciencia clásica se revele capaz de asimilarlas: todas las interpretaciones subjetivistas de la entropía y la negación de la singularidad de los procesos irreversibles que implican constituyen, por el contrario, una cierta confirmación de la co-

nocida acusación según la cual el mecanicismo implica un idealismo más o menos reconocido.

Sin embargo, el materialismo dialéctico se enfrentaba a una dificultad básica. ¿Qué relaciones existen entre las leyes generales de la dialéctica y las igualmente universales leyes de movimiento mecánico? ¿«Dejan» estas últimas de aplicarse después de que se ha alcanzado una cierta etapa, o son simplemente falsas o incompletas? ¿Cómo, volviendo a nuestra anterior cuestión, puede ser establecida una relación entre el mundo de los procesos y el mundo de las trayectorias? [11].

Tenemos ahora, sin embargo, dos indicios adicionales en nuestro intento de contestar esta cuestión. Primero, sabemos que no se trata tanto de una cuestión de establecer una conexión entre dos tipos de leyes universales, sino más bien de definir los límites de las leyes universales. Con el descubrimiento de los procesos autoorganizativos, la termodinámica perdió algo de su poder deductivo general. Nos vemos ahora obligados a investigar la estabilidad de las estructuras específicas creadas por los procesos irreversibles bajo ciertas circunstancias. Más aún, con el desarrollo de la termodinámica, tuvieron lugar otras transformaciones conceptuales fundamentales en la ciencia. La situación de la dinámica clásica en la física ya no es la que era en los tiempos de Boltzmann, Poincaré o Lenin. Lo que a finales del siglo XIX podía ser descrito como un «océano» que separaba la termodinámica de la dinámica, el mundo del ser del mundo del devenir, se ha reducido ahora a un simple «río», esto es, algo que aún es demasiado ancho para ser ignorado, pero suficientemente estrecho para construir un puente sobre él.

Es este puente lo que queda por examinar y para ello debemos volver a nuestro punto de partida, a las nociones básicas de la dinámica, al concepto de tiempo. El progreso que a continuación describiremos nos llevará a un cambio profundo de dicho concepto. Codo a codo con el tiempo del reloj que mide el movimiento, habremos de

[11] Muchos filósofos marxistas naturales parecen inspirarse en Engels (citado por Lenin en sus *Cuadernos Filosóficos)* cuando escribió en su *Anti-Duhring* (Moscú, Foreing Languages Publishing House, 1954, p. 167): «El movimiento es una contradicción: incluso el simple cambio mecánico de posición puede producirse únicamente cuando un cuerpo se encuentra en un mismo instante de tiempo a la vez en un lugar y en otro distinto, estando y no estando en un mismo lugar.»

introducir un «segundo tiempo», un tiempo sin movimiento relacionado muy de cerca con el devenir termodinámico. Pero antes de pasar a describir estos recientes desarrollos, debemos primero colocarlos en el marco de la renovación sufrida por la física durante este siglo.

Capítulo VIII
LA RENOVACION DE LA CIENCIA CONTEMPORANEA

1. *Más allá de la sencillez microscópica*

La ciencia newtoniana constituía una síntesis, la termodinámica constituía otra. Estas síntesis hacen que la historia de las ciencias sea una evolución llena de sorpresas, muy diferente del desarrollo monótono e irreversible de especialidades más y más encerradas que sugiere la analogía con la evolución de las especies biológicas. La convergencia de distintos problemas y distintos puntos de vista, cuando se produce, puede, por el contrario, romper los compartimentos y agitar la cultura científica y también la no científica, cuyas preocupaciones a menudo han servido de fuente de inspiración y son transformadas otra vez. El éxito parcial de Boltzmann y el escepticismo de Poincaré indican que había de alcanzarse una nueva síntesis de dos síntesis enfrentadas para llegar a un concepto coherente de la naturaleza. Tal síntesis está tomando forma hoy, tan inesperadamente como las que la precedieron, producida a su vez por la convergencia de investigaciones que han contribuido a que abandonemos el concepto newtoniano de que una teoría científica debería ser: universal, determinista, objetiva en cuanto que no contiene referencias al ob-

servador, completa en cuanto que alcanza el nivel fundamental de descripción que escapa a las garras del tiempo.

La observación del movimiento de los cuerpos celestes con sus periodicidades fue sin duda una de las primeras fuentes de inspiración del proyecto de la ciencia clásica, esto es, descubrir la permanencia como respuesta al cambio. De igual manera, aquellos que buscaban la materia buscaban en ella la simplicidad que habría de caracterizar al nivel elemental. Esta concepción parecía estar en completa armonía con la existencia de los átomos, aquellos objetos indivisibles que para los antiguos eran las letras con las cuales el texto del mundo estaba escrito.

Sin embargo, desde la época clásica el Universo accesible a nuestra investigación ha estallado. Considérense, efectivamente, las dimensiones abiertas a la investigación científica; ahora podemos estudiar partículas elementales cuyos radios son tan pequeños como 10^{-15} cm, y estudiar señales procedentes de los confines del Universo desde distancias del orden de 10^{28} cm. Por tanto, nuestro conocimiento, aunque con numerosas lagunas, trata fenómenos que cubren una escala de cuarenta potencias de 10. Pero, quizá, más importante que el aumento del tamaño del Universo accesible a nuestro estudio es el cambio en nuestra manera de concebirlo. Mientras que la ciencia clásica hacía énfasis en la permanencia, ahora encontramos cambio y evolución, encontramos partículas elementales transformándose unas en otras, chocándose, descomponiéndose y naciendo; ya no vemos en el cielo las trayectorias periódicas que llenaban de admiración el corazón de Kant, como lo hacía la ley moral que residía en él; ahora vemos objetos extraños, quasars, pulsars, galaxias que explotan y se desgarran, estrellas que, según nos dicen, colapsan para formar «agujeros negros» los cuales irreversiblemente devoran todo lo que consiguen atrapar; y, con la radiación residual del cuerpo negro, el Universo completo parece conservar memoria de su orígen, la memoria del acontecimiento que puso en marcha la presente historia del Universo.

El tiempo no sólo se ha introducido en la biología, la geología y la ciencia de las sociedades y culturas, sino también en los dos niveles de los cuales estaba tradicionalmente excluido, a saber, el nivel microscópico fundamental y el nivel cósmico global.

Hemos hablado de un nivel fundamental como si hubiera sido finalmente descubierto, como si la ambición del hombre de reducir la complejidad del mundo al comportamiento simple de un número de-

finido de partículas hubiera sido llevada a cabo. En varias ocasiones, desde luego, algunos pensaron que lo habían conseguido; se escudriñaba en el átomo con su núcleo positivo y electrones negativos, después en el núcleo con sus protones y neutrones, los ladrillos de los que estaría formado el Universo, pero siempre se encontraba otro nivel aparentemente más fundamental que hacía necesaria la introducción de nuevas partículas e interacciones. Desde el punto de vista teórico, el objeto de la búsqueda era encontrar alguna ley universal para reemplazar la de Newton y que diera cuenta de las nuevas interacciones descubiertas, la teoría unitaria, la fórmula mágica de la que el diablillo matemático pudiera deducir todas las leyes físicas. Pero dicha ley aún no se ha encontrado.

Esta búsqueda, que obsesionaba a Einstein y que todavía permite a algunos presentar, con acento religioso, las dificultades en el estudio de las partículas elementales como la «crisis» en la que se juega el destino del conocimiento humano, nos es hoy extraña. Ya no podemos compartir el optimismo que ella implica, la idea de la simplicidad de algún hipotético nivel microscópico. Las partículas elementales *no son más simples* en el mundo de las estrellas. Los únicos objetos cuyo comportamiento es verdaderamente «simple» pertenecen a nuestro propio mundo, a nuestra escala macroscópica. Son los primeros objetos que fueron escogidos por la ciencia newtoniana: planetas, cuerpos que caen, péndulos. La ciencia clásica había elegido, ciudadosamente, sus objetos en este rango intermedio. Ahora sabemos, sin embargo, que esta simplicidad no es el sello distintivo de lo fundamental y que no puede ser atribuida al resto del mundo.

Aparentemente, esto podría bastar. Sabemos ahora que la estabilidad y simplicidad son excepciones. Podríamos desatender las pretensiones totalitarias de conceptualización, las cuales, de hecho, se aplican solamente a estos objetos simples y estables. ¿Por qué preocuparnos de la incompatibilidad entre la dinámica y la termodinámica, si el espectro del nivel fundamental que la dinámica pretendía describir, de hecho se ha desvanecido?

Esto significaría olvidar las palabras de Whitehead, las cuales han sido constantemente confirmadas por la historia de la ciencia: el choque entre doctrinas es una oportunidad. El abandono puro y simple de ciertos temas bajo el pretexto de que son poco razonables ha sido a menudo propuesto y raramente aceptado. A principios de este siglo, varios físicos sugirieron el abandono del determinismo, por razones prácticas, como solución a la paradoja de Loschmidt, i.g. la pa-

radoja de la inversión de la velocidad y la consecuente disminución de la entropía. Si las leyes que regulan el conjunto de partículas descrita por Boltzmann son intrínsecamente estadísticas, si el caos molecular constituye la verdad fundamental, la operación de inversión de velocidades será insuficiente, no podrá impedir que el sistema vuelva hacia su pasado [1].

Más próximo a nuestros días, Brillouin también intentó asestar un duro golpe al determinismo citando la verdad de sentido común de que una predicción precisa requiere un conocimiento preciso de las condiciones iniciales, y hay que pagar por este conocimiento; la predicción exacta asumida por el determinismo exige pagar un precio «infinito»; es, por consiguiente, no realista.

Estas objeciones al mundo conceptual de la dinámica tienen un inconveniente, son razonables pero estériles; no son fructíferas por sí mismas y no arrojan nuevas luces sobre la realidad. Afirman gobernar y racionalizar el diálogo con la naturaleza pero no llevan en sí la promesa de un nuevo diálogo, el descubrimiento de una nueva riqueza, de un nuevo campo de exploración.

Esta es la razón por la cual las demostraciones de imposibilidad han jugado un papel tan importante. El descubrimiento de una nueva imposibilidad física no es el resultado de ceder ante el sentido común. Es el descubrimiento de una inesperada estructura intrínseca de la realidad que condena una empresa intelectual al fracaso. La consecuencia de tal descubrimiento es excluir la posibilidad de alguna operación que se podía imaginar como factible, al menos en principio. «Ninguna máquina puede tener una eficiencia mayor de uno», «ninguna máquina térmica puede producir trabajo útil a menos que esté en contacto con dos focos»; estos son ejemplos de declaraciones de imposibilidad que han conducido a nuevas oportunidades para la ciencia.

En nuestro siglo se ha llegado a dos nuevas pruebas de imposibilidad, una en relatividad y la otra en mecánica cuántica. Estas han sido, sin embargo, a menudo experimentadas «a la inversa», como descubrimiento de las limitaciones impuestas a las ambiciones de la física. Parecen señalar al mismo tiempo el apogeo y la crisis última, el final de una exploración que ha alcanzado sus límites. Estas dos revoluciones científicas del siglo XX pueden, sin embargo, ser enfo-

[1] Ver con respecto a esto: S. Brush, *Statistical Physical and Irreversible Processes,* particularmente las pp. 616-625.

cadas bajo otro punto de vista, no como el fin, sino como el principio, como la apertura de nuevas posibilidades.

2. *El fin de la universalidad: la relatividad*

Uno de los requisitos fundamentales de la teoría de la relatividad es el que la descripción ha de ser consistente con los medios disponibles a un observador perteneciente a este mundo, no a algún ser independiente de toda ligadura física que contemple el mundo «desde fuera». En conexión con la propagación de señales es donde aparece un límite que no puede ser transgredido por ningún observador. En efecto, *c*, la velocidad de la luz en el vacío (c=300.000 Km/s), es la velocidad límite para la propagación de señales cualquiera que sea su naturaleza (ondas electromagnéticas, sonoras o químicas), jugando, por tanto, un papel fundamental: el de constante universal de la naturaleza.

No existe en la física newtoniana una constante universal como *c*, cuya pretensión de universalidad se basa en que puede ser aplicada sin tener en cuenta la escala de los objetos. El movimiento de los átomos, planetas y estrellas está gobernado por una única ley, siendo así el Universo homogéneo y el sueño de los antiguos, siempre recurrente, es aún posible: ¿puede ser que nuestro sistema planetario sea, únicamente, un átomo contenido en algún gigantesco organismo? ¿Y no podríamos ser nosotros un Universo para seres diminutos que, sin embargo, se nos parecen cualitativamente? Este sueño ha sido definitivamente desbaratado por el descubrimiento de las constantes universales.

La relatividad, a la vez que lleva a cabo la síntesis de la dinámica y el campo electromagnético responsable de la propagación de la luz, establece una distinción entre bajas velocidades y altas velocidades, por ejemplo, las que pueden compararse a la velocidad de la luz. Una clara distinción en el comportamiento de los objetos físicos podría hacerse teniendo en cuenta si su velocidad se acerca a la de la luz o es mucho menor. De igual manera, la constante de Planck, *h*, a la cual nos referiremos más adelante, impone una escala natural según la masa de los objetos. El átomo ya no puede ser considerado como un diminuto sistema planetario. Los electrones pertenecen a distinta escala que los planetas y que los otros objetos macroscópicos, pesados y lentos, incluidos nosotros mismos.

Las constantes universales no sólo destruyen la homogeneidad del Universo al introducir escalas físicas según las cuales diferentes comportamientos son cualitativamente distintos, sino que, además, las constantes universales conducen a una nueva concepción de la objetividad física. Ningún ser sometido a las leyes de la física puede transmitir señales a una velocidad mayor que la de la luz en el vacío. De aquí la notable conclusión a la que llegó Einstein: la simultaneidad absoluta de dos sucesos distantes no puede ser definida. La simultaneidad puede ser únicamente definida en términos de un determinado sistema de referencia. No es este el lugar para hacer una descripción de la física relativista. Señalemos aquí, únicamente, que las leyes de Newton no suponían que el observador fuera un «ser físico». Precisamente se definía descripción objetiva como la ausencia de cualquier referencia a su autor. Para los seres inteligentes «no-físicos» capaces de comunicarse a una velocidad infinita, las leyes de la relatividad serían incorrectas. El hecho de que la relatividad se basa en una limitación que se aplica sólo a observadores físicamente localizados, a seres que pueden estar solamente en un lugar a un tiempo y no en ninguna otra parte, da a esta física una cualidad *humana*. Esto no quiere decir, sin embargo, que se trata de una física subjetiva, resultado de nuestras preferencias y convicciones; es una física sujeta a limitaciones intrínsecas que nos identifican como parte del mundo físico que describimos. Y es esta física la que presupone un observador situado en el mundo, y no la física del absoluto, la que es confirmada por el experimento. Nuestro diálogo con la naturaleza puede únicamente tener lugar desde dentro de la naturaleza, y la naturaleza sólo responde a aquellos que explícitamente admiten ser parte de ella.

3. *La muerte del objeto galileano: la mecánica cuántica*

La relatividad ha modificado el concepto clásico de objetividad física, pero ha mantenido intacta otra característica fundamental de la física clásica, concretamente la ambición de alcanzar una descripción «completa» de la naturaleza. Después de la relatividad, el físico no puede ya apelar a la extrapolación de un espíritu sobrenatural observando desde fuera todo el Universo, pero puede aún concebir un matemático supremo que, como Einstein argumentaba, ni engañaba ni jugaba a los dados y que conocía la fórmula del Universo a partir de

la cual todos los posibles puntos de vista del mundo podrían ser derivados. En este sentido la relatividad es aún una continuación de la física clásica.

La mecánica cuántica, por otra parte, es la primera teoría física que ha roto verdaderamente con el pasado. La mecánica cuántica no sólo nos sitúa en la naturaleza, también nos etiqueta como seres «pesados» compuestos de un número macroscópico de átomos. Para visualizar más claramente las consecuencias de que la velocidad de la luz sea una constante universal, Einstein se imaginó a sí mismo montado en un fotón. Pero la mecánica cuántica ha descubierto que somos demasiado pesados para montar en electrones o fotones. Es imposible imaginarnos en el lugar de tales seres etéreos, o identificarnos con ellos, o describir lo que piensan si fueran capaces de pensar lo que experimentan, si fueran capaces de sentir algo.

A pesar de que han transcurrido más de cincuenta años desde que Bohr, Heisenberg y otros llegaran a esta conclusión, es todavía difícil integrarla, incluso aceptarla, para aquellos que, como Einstein, luchan para que la física no renuncie a poder describir el electrón «en sí mismo», abstracción hecha de las limitaciones impuestas por el carácter macroscópico de nuestros instrumentos de medida.

Esta es la esencia de la renombrada disputa de las «variables ocultas». ¿Es posible concebir el movimiento de los electrones y de las otras entidades cuánticas como determinado por variables físicas, incluso si estas variables son «ocultas», inobservables para nosotros? En otras palabras, ¿es imposible un retorno al punto de vista clásico? Recientemente se han llevado a cabo muchos intentos de encontrar al menos una respuesta a esta cuestión. Se han preparado ingeniosos experimentos. Hasta ahora la respuesta parece ser negativa; la existencia de variables ocultas nos conduciría a consecuencias en contradicción con la evidencia experimental [2].

Nuestro punto de vista es muy distinto. Como veremos, la mecánica cuántica introduce de hecho una nueva coherencia dentro de la dinámica. Las «propiedades de onda» de la materia expresan precisamente el carácter colectivo del movimiento. Las variables ocultas conducirían a la situación contraria, puesto que su efecto sería des-

[2] Ver, acerca de las pruebas experimentales recientemente concebidas para las variables ocultas: B. D'Espagnat, *Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, segunda edición aumentada, Reading, Mass., Benjamin, 1976.

truir la coherencia, incrementar el desorden. En cierto sentido el problema planteado por la mecánica cuántica no es añadir nuevas variables, sino reducir el número de variables introducido por la mecánica clásica.

La historia de la mecánica cuántica, como la de todas las innovaciones conceptuales, es compleja, llena de sucesos inesperados, la historia de una lógica cuyas implicaciones son descubiertas después de que ha sido concebida en la urgencia del diálogo experimental.

No podemos relatar esa historia aquí, sino solamente subrayar la manera inesperada en que participa de la convergencia que hoy llega a renovar la dinámica, a construir el puente entre esta ciencia del ser y el mundo del devenir.

En los comienzos de la mecánica cuántica, había una cierta cantidad de datos nuevos que la mecánica clásica era incapaz de explicar, al igual que había fracasado, un siglo antes, en el intento de expresar las leyes que gobiernan las máquinas nuevas que ponían en juego, no ya las fuerzas de gravedad, sino la fuerza motriz del fuego. Una vez más el fuego está presente, el calor, la chispa eléctrica que excita un cuerpo químicamente puro y la luz que emite o absorbe este cuerpo excitado. A finales del siglo XIX se sabía que cada elemento químico emite una luz específica que, contrariamente a la luz blanca, no posee el espectro continuo de frecuencia, sino solamente uno discontinuo. Dicha luz, al descomponerse en las frecuencias que la forman, impresiona una placa fotográfica, revelando una verdadera *rúbrica* de ese elemento químico, un conjunto de rayas, de líneas de una intensidad y frecuencia características. ¿Por qué un átomo excitado emite una serie de frecuencias discontinuas? ¿Qué estructura atómica puede explicar que cada elemento químico tenga un espectro particular? Estos son los datos del estudio espectroscópico de la materia que constituyen uno de los históricos puntos de partida de la mecánica cuántica.

Por otra parte, en 1900, el estudio de ciertas propiedades de las radiaciones luminosas llevó a Max Planck a introducir una nueva constante universal. En el comienzo de los trabajos de Planck subyacía la ambición de lograr para la interacción materia-luz lo que Boltzmann había conseguido para la interacción materia-materia: describir un modelo cinético de la evolución irreversible. En el curso de estos trabajos (sobre el «cuerpo negro») se vio forzado a admitir que tan sólo una repartición discontinua de la energía (cuyo «grano elemental» puede definir *h)* podría dar sentido a los datos experimentales.

Una vez más, el desafío de la irreversibilidad había conducido a un progreso decisivo de la física.

El descubrimiento de Planck permaneció aislado y casi ignorado hasta que Einstein (1905) presentó la primera interpretación general de la constante *h*, y sus implicaciones en lo que concierne a la naturaleza de la luz. La constante de Planck asocia el aspecto ondulatorio de la luz, conocido desde el siglo XVII, a un aspecto aparentemente contradictorio, el aspecto corpuscular. La onda luminosa se caracteriza por una frecuencia, ν, y una longitud de onda, λ; *h* permite pasar de la frecuencia a una magnitud corpuscular, un «grano» o quantum de energía ($h\nu=\varepsilon$), y nos permite pasar de λ a una magnitud mecánica, el momento, o cantidad de movimiento ($h/\lambda=p$). Esta dualidad onda-corpúsculo fue extendida por Louis de Broglie a la materia (1924) y fue el punto de partida de la formulación moderna de la mecánica cuántica, con el trastorno de las categorías clásicas y de la causalidad. Pero al principio, la cuantificación de la energía aplicada por Einstein a problemas como el del calor específico a baja temperatura, inspiró la idea de que los átomos y las moléculas no evolucionan de manera continua, sino que «saltan» entre los niveles discretos de energía, que son los únicos en los que se pueden encontrar.

Anteriormente Niels Bohr había unido la nueva física cuántica a los espectros de emisión y absorción de los átomos. En 1913 Bohr propuso un modelo simple para el átomo basado, sin embargo, en postulados *ad hoc*. Según el modelo de Bohr, los electrones cargados negativamente se mueven en órbitas alrededor del núcleo cargado positivamente. La primera paradoja era que, bajo estas condiciones, el electrón cargado debería, de acuerdo con la física clásica, emitir radiación, perdiendo de esta manera energía gradualmente hasta estrellarse contra el núcleo. En otras palabras, la órbita electrónica descrita por Bohr no podía ser estable. Por consiguiente, Bohr postula que tales órbitas periódicas no podían ser descritas en términos de la física clásica; postula explícitamente la estacionariedad de la órbita electrónica y el carácter conservativo del movimiento del electrón; postula que éste no emite radiación cuando gira sobre su órbita. Desde ese momento, puede mantenerse allí indefinidamente.

Solamente cuando el átomo es excitado el electrón puede ser expulsado de su órbita y en el momento en que pasa de una órbita a otra emite o absorbe un fotón cuya frecuencia corresponde a la diferencia de las energías que caracterizan el movimiento electrónico en cada una de las dos órbitas; de ahí los espectros de absorción en

los que se repiten las frecuencias luminosas de los fotones absorbidos por los electrones que saltan hacia las órbitas más alejadas del núcleo y los espectros de emisión, radiación emitida espontáneamente por los átomos cuando caen del estado excitado al estado normal: los electrones emiten un fotón cuando saltan a una órbita más cercana al núcleo, en donde su movimiento tendrá una energía menor.

Queda por explicar el carácter discontinuo y específico de las líneas espectrales. Aquí intervienen directamente los «niveles cuánticos». Segundo postulado: cada átomo tiene un cierto número de órbitas permitidas. La energía asociada al movimiento orbital del electrón puede adoptar únicamente ciertos valores determinados. La rúbrica espectroscópica del átomo, de las líneas espectrales que emite o absorbe, mide así la diferencia entre los niveles de energías permitidas para cada átomo y nos permite identificar y calcular el valor de todas las órbitas características de cada tipo de átomo o de molécula, de todos los estados estacionarios cuánticos de cada cuerpo químico.

Una de las consecuencias del modelo de Bohr [3] es que, dado que el movimiento orbital no emite ni absorbe energía alguna, no produce nada que podamos medir, no interacciona con el mundo exterior. Unicamente podemos saber algo del electrón cuando salta de una órbita a otra; entonces podemos conocer la diferencia de energía entre ambos niveles orbitales. Como consecuencia, solamente son observables y reconstruibles los niveles de energía de las órbitas, pero nos es imposible conocer el propio movimiento sobre estas órbitas, la posición y velocidad del electrón en cada instante.

El modelo de Bohr incorpora elementos heterogéneos. Por un lado, su formulación se hace en términos de mecánica clásica y, más específicamente, en términos de sistemas integrales simples (ver capítulo II, sección 3). Por otro lado, añade reglas suplementarias (naturaleza estacionaria de las órbitas que corresponden a niveles cuánticos o emisión de radiación sólo en el momento de los «saltos»).

Es interesante comparar la teoría de Bohr con la de Boltzmann, descrita en el capítulo precedente. En ambos casos la intuición física juega un papel esencial y, en este sentido, ambas proporcionan excelentes ejemplos de un diálogo con la naturaleza según se discutió en

---

[3] Feuer ha demostrado, bastante convincentemente, cómo el contexto cultural de la juventud de Bohr podría haber ayudado en su decisión de buscar un modelo no mecanicista del átomo (*Einstein and the Generations of Science*, Nueva York, Basic Books, 1974).

la introducción. En ambos casos, el modelo fue más allá de la ciencia establecida del momento: no se trataba de deducción, sino más bien de un avance hacia continentes desconocidos. Los esquemas teóricos postulados por Boltzmann y Bohr permitían una mejor comprensión de los datos experimentales, pero sobre todo servirían de estímulo a investigaciones cuyos hallazgos aún dominan la ciencia contemporánea.

En el caso de la teoría cuántica, se debe a Heisenberg, Born y Jordan, además de a Schrödinger y Dirac (durante el período 1925-1927), el haber transformado el modelo fenomenológico de Bohr en una estructura coherente, muy elaborada, que incorpora la dualidad onda-corpúsculo de Broglie y Einstein.

Primero y más importante, hubo de ser introducida una nueva formulación, desconocida en la física clásica, que permitiera la incorporación de la «cuantificación» al lenguaje teórico. El hecho básico es que un átomo se puede encontrar solamente en niveles de energía discretos correspondientes a las diferentes órbitas electrónicas. En particular, esto quiere decir que la energía (o el hamiltoniano) ya no puede ser simplemente una función de la posición y del momento, como lo es en mecánica clásica, ya que dando a las posiciones y momentos valores ligeramente distintos se podría hacer variar la energía de una manera continua, mientras que la observación revela que sólo existen niveles discretos.

Este descubrimiento de lo inadecuado de los conceptos de la dinámica clásica no puede separarse de la prevaleciente atmósfera general de «crisis», especialmente en Alemania, después de la Primera Guerra Mundial. Parece ser que muchos jóvenes físicos de la época, y especialmente Heisenberg, admitieron de buen grado la introducción de nuevas herramientas conceptuales, tales como los operadores, como una liberación ideológica [4]. Sin embargo, conviene subrayar que, cualquiera que sea el contexto social y cultural de su invención, los operadores se han impuesto en física porque constituyen el único método formulado hasta hoy para tomar cuenta de la cuantificación.

Con el fin de comprender el papel desempeñado por los opera-

---

[4] Heisenberg, W., *La partie et le tout*, París, Albin Michel, 1972, y Serwer, D., «Unmechanischer Zwang: Pauli, Heisenberg and the Rejection of the Mechanical Atom, 1923-1925», en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 8, 1977, pp. 189-256.

dores asociados por Heisenberg y otros fundadores de la mecánica cuántica a las magnitudes físicas de la mecánica clásica, tales como, por ejemplo, las coordenadas de posición q, los momentos p, o la energía $H(p, q)$, debemos introducir además los objetos sobre los que actúan u «operan» los operadores.

Como ejemplo tomemos como «operador» matemático la derivada representada por d/dx y supongamos que actúa sobre una función, digamos x^2; el resultado de esta operaciones otra nueva función, que es «$2x$». Sin embargo, ciertas funciones se comportan peculiarmente con respecto a la derivación. Por ejemplo, la derivada de «e^{3x}», es «$3e^{3x}$», es decir, recuperamos la función original simplemente multiplicada por un número, en este caso 3. Las funciones que vuelven a obtenerse cuando se les aplica un operador dado se conocen con el nombre de «funciones propias» (autofunciones) de este operador y los números por los cuales resulta la función multiplicada después de la aplicación del operador son los «valores propios» (autovalores) del operador.

A cada operador le corresponde un conjunto, un «depósito» de valores numéricos; este conjunto forma su «espectro». Este espectro es «discreto» cuando los valores propios constituyen una serie discreta. Existe, por ejemplo, un operador cuyos valores propios son todos los enteros 0, 1, 2... Un espectro también puede ser continuo, por ejemplo, estando formado por todos los números reales entre 0 y 1.

A cada magnitud física en mecánica clásica corresponde en mecánica cuántica un operador y los valores numéricos que puede tomar dicha magnitud son los autovalores del operador. El punto esencial es que el concepto de magnitud física (representada por un operador) es ahora diferente del de sus valores numéricos (representados por los autovalores del operador). En particular, la energía estará ahora representada por el operador hamiltoniano y los niveles, por ejemplo, los valores de energía observados, se identificarán con los valores propios correspondientes a este operador.

Dentro del campo de la física atómica y molecular, esta audaz construcción ha sido admirablemente verificada por la experiencia.

La introducción de los operadores ha abierto a la física un mundo microscópico de insospechada riqueza, y ciertamente uno de los inconvenientes de este libro es el no poder dedicar más espacio a este fascinante tema, en el cual la imaginación creativa y la observación experimental se combinan con tanto éxito. Aquí queremos subrayar

únicamente el hecho de que la mecánica cuántica ha demostrado que el mundo microscópico está gobernado por unas leyes que tienen una nueva estructura, poniendo fin, por consiguiente, de una vez por todas, a la esperanza de descubrir un único esquema conceptual.

Cada lenguaje posee una lógica que se supone en toda frase, pero que cada una de ellas tomada en particular, no revela más que parcialmente. Cada lenguaje matemático, ideado para expresar una situación determinada, puede en realidad abrir campos de investigación ricos en sorpresas, mucho más allá de las expectativas de quienes lo comenzaron. La estructura de la mecánica cuántica, cuya existencia se debe a los descubrimientos experimentales, pronto habría de revelarse rebosante de nuevo contenido físico, propiamente hablando, inaudito.

En la actualidad, podemos interrogarnos, retrocediendo en el tiempo, acerca del significado de los operadores. Desde el punto de vista histórico, los operadores están asociados a la existencia de niveles de energía y, por otra parte, veremos también la interpretación que Niels Bohr les ha dado con la complementariedad. Pero, como veremos, hoy los operadores tienen aplicaciones incluso en la mecánica clásica; es decir, su significado se ha extendido más allá de la expectativa de los fundadores de la mecánica cuántica. De forma bastante general, se puede decir que la noción de operador aparece ahora de forma natural tan pronto como, por una razón u otra, el concepto de trayectoria dinámica ha de ser modificado e introducida una descripción estadística, *tanto en mecánica clásica como en mecánica cuántica*. Más adelante estudiaremos algunas de las razones que llevan a tal modificación y que pueden ser múltiples. Lo esencial es *el abandono de la trayectoria* y del determinismo que ésta implica, que conduce a la introducción en física del concepto de operador.

4. *Relaciones de incertidumbre y complementariedad*

Hemos visto que un «operador» actúa sobre una función. Si ésta es una función propia, puede decirse que la magnitud física que representa el operador tiene un valor definido, es decir, precisamente el valor propio correspondiente. Consideremos en mayor detalle *dos* magnitudes físicas representadas por los operadores O_1 y O_2. ¿Podemos atribuirles *simultáneamente* valores bien definidos? Esta cuestión admite una respuesta precisa en el marco de la mecánica cuántica. Con ayuda de O_1 y O_2 podemos formar los dos operadores O_1

O_2 y $O_2\ O_1$, que difieren entre sí por el orden de las operaciones: $O_1\ O_2f{=}O_1\ (O_2f)$ significa que aplicamos primero O_2 a la función f y después O_1 al resultado, mientras que $O_2\ O_1f$ corresponde al orden inverso. En general, los resultados son diferentes según se aplique $O_1\ O_2$ ó $O_2\ O_1$ y, por tanto, se dice que los operadores O_1 y O_2 no conmutan. Tomemos un ejemplo: si O_1 es el operador «multiplicar por la coordenada q» y O_2 el operador «derivar respecto a q», tenemos $O_1\ O_2f{=}q\ (\partial f/\partial q)$ y $O_2\ O_1f{=}\partial/\partial q\ (qf)$. La regla de derivación de un producto conlleva que $(O_2\ O_1{-}O_1\ O_2)){=}(\partial/\partial q\ q{-}q\partial/\partial q)f{=}f$, y como este resultado es verdadero *sea cual sea la función* f, se escribe de manera abreviada $O_2\ O_1{-}O_1\ O_2{=}1$. $O_2\ O_1{-}O_1\ O_2$ es por definición el *conmutador* de los operadores O_1 y O_2.

Ahora podemos formular la respuesta a la pregunta planteada: no podemos hacer corresponder valores numéricos a la vez a O_1 y O_2 más que si los operadores conmutan, es decir, si $O_1\ O_2{=}O_2\ O_1$. Solamente en el caso de que el sistema pueda ser representado por funciones propias que sean a la vez de O_1 y de O_2. Tomemos primero un ejemplo clásico. Estudiemos la aplicación de los operadores $O_1{=}q$, $O_2{=}\partial/\partial q$ a la función de distribución clásica ϱ en el espacio de fases (el espacio de las coordenadas q y los momentos p). Esto implica simplemente que si ϱ es función propia de q, la distribución estadística en las coordenadas se reduce a un valor bien definido de la coordenada, el valor propio; todos los demás tienen una probabilidad cero. Por el contrario, si ϱ es una función propia de $\partial/\partial q$, se puede demostrar fácilmente que el conjunto estadístico *no depende* de las coordenadas —todos los valores de las coordenadas tienen la misma probabilidad—. Se comprende entonces que una misma función ϱ no pueda ser *a la vez* función propia de q y de $\partial/\partial q$. La distribución ϱ no puede corresponder a la vez a un valor definido e indefinido de la misma magnitud física y la no-conmutación de los operadores q y $\partial/\partial q$ o p y $\partial/\partial q$ expresa simplemente una *imposibilidad lógica.*

Esta no-conmutación toma un significado nuevo y más profundo en mecánica cuántica. Como veremos a continuación de manera más detallada, la constante h *reduce* el número de variables con respecto a las necesarias para describir completamente un sistema clásico. Coordenadas y cantidades de movimiento (q y p) dejan de ser independientes. Podríamos haber deducido esta disminución del número de variables a partir de la relación de Einstein y de Broglie, $\lambda{=}h/p$, que asocia la longitud de onda λ *(propiedad ondulatoria)* a la cantidad de movimiento p (propiedad corpuscular). De este modo, la cons-

tante de Planck conecta las magnitudes (y, por tanto, las coordenadas) a las cantidades de movimiento. Más exactamente, la mecánica cuántica asocia a q y p los operadores $q_{op}=q$ y $p_{op}=h/2\pi i\partial/\partial q$, lo que, como hemos visto, los define como no-conmutables (podría tomarse también $q_{pp}=h/2\pi i/\partial q$, $p_{op}=p$, lo que es esencial es que los operadores asociados a las coordenadas y a las cantidades de movimiento no conmuten en ningún caso.

La «imposibilidad lógica» que hemos encontrado en mecánica clásica adquiere un nuevo significado. No podemos atribuir a p y q simultáneamente valores bien definidos en mecánica cuántica. De ahí el nombre de relación de incertidumbre asignado por Heisenberg a esta relación de no-conmutación.

En mecánica clásica podemos considerar toda una gama de conjuntos caracterizados por la función ϱ. Por ejemplo, una distribución puede corresponder a un valor bien definido en q e indefinido en p (todos los valores de p tienen la misma probabilidad). También (donde no actúa el fenómeno de inestabilidad que introduciremos en el capítulo siguiente) podemos pasar al límite de una trayectoria única, correspondiente a un colectivo caracterizado *al mismo tiempo* por valores bien definidos de q y de p. En mecánica cuántica esto es imposible. Podemos escoger un colectivo bien definido en q o en p , pero no existe un colectivo bien definido en q y en p al mismo tiempo. La mecánica cuántica, en la novedad radical en la que tanto insistieron Bohr y Heisenberg, no reclama necesariamente una nueva lógica, pues ella corresponde de hecho a la misma exigencia de no-contradicción que el formalismo clásico, sino que redefine lo que es contradictorio.

Niels Bohr abogó por el abandono total del realismo en el sentido clásico. Subrayó que la constante de Planck define como no-descomponible la interacción entre un sistema cuántico y un instrumento de medida. Por tanto, es el *fenómeno* cuántico resultante de la operación de medición a lo que podemos asignar magnitudes cuyos valores numéricos mediremos. Desde ese momento toda descripción implica una *elección* del aparato de medida, necesariamente macroscópico, una elección del dispositivo experimental mediante el cual se explorará el sistema; en suma, una elección de la cuestión a preguntar al sistema cuántico. La respuesta no nos permite descubrir una realidad determinada; el número cuántico medido caracteriza el sistema en el estado propio que hemos *escogido* para producirlo y describirlo, planteándole *experimentalmente* tal cuestión y no tal otra.

La objetividad clásica identifica descripción objetiva del sistema «tal como es en sí mismo» con descripción completa. En este sentido, la mecánica clásica nos impone una redefinición del concepto de objetividad, nos impone no ligar la observación simultánea a las coordenadas y los momentos (o cantidades de movimiento). Pero esta redefinición es más general de lo que creía Bohr, no se limita al problema del «fenómeno» cuántico, de cuya definición forma parte importante la interacción de medida, sino que alcanza también a los sistemas de la dinámica clásica, ya que también en esto el paso al límite hacia las trayectorias puede resultar imposible.

Insistamos en el hecho de que esta nueva objetividad no nos parece resultar siempre de perturbaciones arbitrarias introducidas por la operación de medida y que no es ésta la manera en que debemos comprender el cambio de estructura respecto a la dinámica que medía h. La interpretación con frecuencia sugerida, que coloca en la base de la mecánica cuántica la idea de las perturbaciones que conlleva la observación, conduce, como ya sabemos, a la falsa situación en la que el sistema «en sí mismo», parece efectivamente estar caracterizado por valores bien definidos de todos los parámetros, aun cuando los valores de algunos de ellos se «enturbien» con la medida. El realismo tradicional simplemente se reviste de una apariencia marcadamente positivista: no asignar simultáneamente una posición y una velocidad a una partícula con el pretexto de que, si se mide una, se modifica la otra de manera incontrolable.

Contra esta interpretación, que deja intacta la idea clásica de la realidad física, pero prohíbe abstractamente referirse a ella, Bohr hizo énfasis en la novedad de la idea *positiva* de la necesidad de una elección. El físico no descubre una verdad dada, que acallaba al sistema, sino que ha de elegir un lenguaje, es decir, los conceptos macroscópicos en los que deberá obtener su respuesta. Bohr expresó precisamente esta idea a través del principio de complementariedad.

Ningún lenguaje teórico que articule las variables a las cuales se puede atribuir un valor bien definido puede agotar el contenido físico de un sistema. Los posibles diferentes lenguajes y puntos de vista sobre el sistema son complementarios. Todos ellos tratan la misma realidad aunque es posible reducirlos a una única descripción. Esta naturaleza irreducible de los puntos de vista sobre una misma realidad expresa la imposibilidad de descubrir un punto de vista divino desde el cual toda la realidad es visible simultáneamente. La lección del principio de complementariedad no es, sin embargo, una lección

de resignación. No se trata de renunciar de manera razonable a una descripción demasiado completa o precisa; Bohr solía decir que el pensar en la significación de la mecánica cuántica siempre le producía mareo, y ciertamente marea el ser arrancado de los cómodos hábitos del sentido común y comprender que toda propiedad macroscópica es inseparable de la «claridad» que escogemos proyectar sobre la realidad, y que la realidad es demasiado rica y sus contornos demasiado complejos para que una sola lámpara los pueda iluminar por completo.

La verdadera enseñanza que se puede extraer de este principio de complementariedad y que puede ser, tal vez, llevada a otros campos del conocimiento, consiste en recalcar la riqueza de la realidad, la cual sobrepasa todo posible lenguaje, toda estructura lógica. Cada lenguaje puede expresar, *si bien satisfactoriamente*, únicamente parte de ella. Por consiguiente, la música no se agota con ninguno de sus estilos; el mundo del sonido es más rico que cualquier lenguaje musical, sea la música de los esquimales, Bach o Schoenberg; pero cada una constituye una elección, una exploración electiva y, como tal, la posibilidad de una plenitud [5].

5. *El tiempo cuántico*

Sin embargo, si la mecánica cuántica ha renovado profundamente la física introduciendo por primera vez la idea de operadores que no conmutan, de transformaciones entre puntos de vista distintos, en un aspecto sigue siendo tradicional, y es el de la cuestión del papel desempeñado por el tiempo en la evolución del sistema cuántico. En este nivel, la lógica de la dinámica hamiltoniana impone a la mecánica cuántica el mismo tipo de concepto de cambio que representaba en dinámica.

Al igual que en la dinámica clásica, la energía, convertida en un operador, juega en mecánica cuántica un papel central, de hecho un papel doble. El hamiltoniano clásico era, por una parte, *invariante*

[5] El principio de complementariedad, su significación y sus dificultades se estudian en D'Espagnat, B., *op. cit.*, y *Conceptions de la physique contemporaine*, París, Hermann, 1965; Jammer, M., *The philosophy of Quantum Mechanics*, Nueva York, Wiley, 1974; Petersen, A., *Quantum Mechanics and the Philosophical Tradition*, Boston, MIT Press, 1968.

en el movimiento: expresando la energía total del sistema en términos de variables canónicas, conservaba un valor constante para toda la evolución dinámica de un sistema aislado; pero para el intermediario de las ecuaciones canónicas, era también la estructura del hamiltoniano la que determinaba la evolución de p y de q; era él el que contenía la *ley* del movimiento dinámico. El operador hamiltoniano, H_{op}, le da también por sus valores propios los niveles de energía del sistema. Además, le da la evolución temporal del sistema a través de la ecuación de Schrödinger, que, en mecánica cuántica, sustituye a las ecuaciones canónicas de Hamilton.

La ecuación de Schrödinger, que es una ecuación fundamental de la mecánica cuántica, tiene una estructura muy próxima a la de la ecuación de Liouville, que ya hemos mencionado en el capítulo anterior y que escribimos como $L\varrho = i\partial\varrho/\partial t$. De hecho, se escribe $ih/2\pi\partial\psi/\partial t = H_{op}\psi$. La diferencia principal estriba en el número de variables que admite la mecánica cuántica; ya hemos visto que los operadores que en mecánica cuántica corresponden a las coordenadas q y a los momentos p, no son indpendientes, sino que están unidos por la relación de incertidumbre. Cuando la forma de distribución estadística depende al mismo tiempo de las q y los p, la función de onda ψ en mecánica cuántica depende sólo de la *mitad* de estas variables, ya *sea* de los operadores correspondientes a q, *sea* de los que corresponden a p. La descripción estadística se hace entonces *irreducible*, y no podemos ya pasar al límite de la trayectoria clásica.

La función de onda ψ no tiene un sentido estadístico simple; puede ser positiva o negativa, y, como muestra el símbolo i en la ecuación de Schrödinger, ni siquiera es necesariamente una magnitud real. Pero si tomamos ψ obtenemos una magnitud real positiva, que podemos identificar con una probabilidad. Así, como demostró Max Born, $|\psi(q)|^2$ permite calcular la probabilidad de encontrar una partícula en el punto de coordena q.

De manera general, la regla que relaciona la función de onda con las probabilidades es ésta: para calcular las probabilidades de resultado de una medida determinada, se ha de desarrollar la función ψ según las funciones propias del operador que representa la magnitud física en cuestión, es decir, se ha de representar ψ como $\Sigma_i c_i u_i$, como una superposición de estas funciones propias «u_i». Cada función u_i ... u_n es ponderada por un coeficiente c_i ... c_n y cada c_i permite calcular la *probabilidad* de que la medida efectuada sobre el sistema dé el valor propio correspondiente a la función propia u_i.

Sólo existe un caso en el que la ecuación de Schrödinger lleva a una predicción determinista y es cuando ψ, en lugar de ser una *superposición* de funciones propias, *se reduce* a una sola entre todas ellas. Así, se puede preparar un sistema de forma que se pueda predecir el resultado de una medida determinada. Entonces «sabemos» que el sistema es descrito por la función propia correspondiente. Pero, y encontramos aquí relaciones de incertidumbre, solamente se podrán dar informaciones *estadísticas* de las magnitudes que correspondan a operadores que no conmutan con aquél cuyo valor propio se determina.

Por tanto, debemos subrayar que ψ no es una cantidad física observable en sí misma, sino que contiene la evolución de las diferentes probabilidades de los valores que pueden tomar las magnitudes observables. Es su evolución la que determina todo cambio observable del sistema en el transcurso del tiempo. Como ya hemos dicho, de manera análoga a la dinámica, es el operador hamiltoniano el que determina esta evolución $H_{op}\psi = hi/2\pi \partial\psi/\partial t$. Y esta ecuación de Schrödinger, al igual que las ecuaciones dinámicas regidas por el hamiltoniano clásico, genera una evolución de ψ *reversible y determinista*. Al movimiento reversible sobre una trayectoria le corresponde el cambio reversible de la función de onda. Por otra parte, cuando se conoce la función de onda en un instante dado, la ecuación de Schrödinger permite calcularla en cualquier instante anterior o posterior: la situación es desde este punto de vista estrictamente similar a la de la mecánica clásica. Esto es debido al hecho de que las relaciones de incertidumbre de la mecánica cuántica no se aplican al tiempo. Esto permanece como un número, no como un operador, y solamente los operadores pueden aparecer en las relaciones de incertidumbre. Pero como veremos en el capítulo siguiente, esta conclusión no es general: ciertos sistemas, clásicos o cuánticos, nos permite introducir un segundo tiempo, un tiempo-operador que obedecerá a una relación de incertidumbre. Esta es una conclusión notable: la relación entre el «ser» y el «devenir» se convierte a su vez en objeto de una complementariedad ampliada. Pero no nos anticipemos.

La representación del sistema según las funciones propias del operador hamiltoniano constituye exactamente el análogo cuántico de la representación privilegiada de los sistemas integrables clásicos, en términos de los invariantes del movimiento (capítulo II, 3). Así, por ejemplo, el modelo atómico de Bohr, con sus orbitales en los niveles de energía bien definidos, corresponde a este tipo de representación: la probabilidad de encontrar el electrón en una órbita estacionaria de

energía E no varía en el tiempo. De manera general, los estados *estacionarios superpuestos que constituyen* ψ *en esta representación* evolucionan sin interaccionar los unos con los otros, como si cada uno estuviera «solo en el mundo». De esta forma aparece más claramente el hecho de que, al igual que las ecuaciones dinámicas, la ecuación de Schrödinger describe una evolución en la que no puede «producirse» nada nuevo.

Sin embargo, sabemos que el electrón no se mantiene indefinidamente en su órbita, si no, seríamos incapaces de describirlo. Cuando el sistema es perturbado por una interacción con el mundo exterior, puede sufrir una transformación irreversible, el electrón puede cambiar de estado estacionario, saltar de una órbita a otra, y sólo gracias a este proceso podemos conocer los valores de los diferentes niveles de energía del sistema. A causa de esta intervención de un proceso irreversible, necesaria para hacer accesibles los datos sobre los estados estacionarios, el problema de la irreversibilidad, lejos de ser resuelto por la mecánica cuántica, se plantea con renovada urgencia.

El hecho de que la evolución de la función de onda no permita describir la interacción con el mundo, gracias a la cual conocemos las informaciones sobre el sistema cuántico, constituye hoy el centro de interés de los especialistas en mecánica cuántica. Es el problema de la medida.

Toda medida, como señalaron repetidamente N. Bohr y L. Rosefeld, contiene un elemento de *irreversibilidad*, una llamada a fenómenos irreversibles como, por ejemplo, procesos químicos correspondientes a la grabación fotoquímica de los *datos* [6]. Esto ya ocurría en mecánica clásica. Cuando se trata de fenómenos cuánticos, la obtención de los datos puede idealizarse como localización espacio-temporal instantánea. La grabación se acompaña de una amplificación tal, que un efecto microscópico produce un efecto al nivel macroscópico, un nivel observable en el cual podemos descifrar los instrumentos de medida. *El fenómeno cuántico supone irreversibilidad.*

---

[6] Rosenfeld insistió especialmente en la dimensión materialista de la idea de que sólo podemos conocer el mundo por las interacciones irreversibles. Véase Rosenfeld, L., «L'evidence de la complémentarité», en *Louis de Broglie, physicien et penseur,* París, Albin Michel, 1953, «The Measuring Process in Quantum Mechanics», en *Supplement of the Progress in Theoretical physics,* 1965, p. 222, y a lo largo del coloquio *Observation and Interpretation,* ed. Körner, S., Londres, Butterworth's Scientific Publications, 1957.

Pero el problema de la medida es esencial en mecánica cuántica, sobre todo porque se plantea en el propio nivel del formalismo. El proceso ideal de medida cuántica es también una preparación: «reduce» la función de onda ψ (expresada antes de la medida por una superposición de funciones propias del operador correspondiente a la magnitud física medida *a una sola* de estas funciones propias). El sistema medido ya no se representará mediante una superposición, ya no hay una distribución de probabilidades para encontrarlo en cada uno de los estados propios caracterizados por un valor determinado de la magnitud medida. El sistema se encuentra, con certidumbre, en el estado propio indicado por el resultado de la medida. Este proceso de *reducir* la función de onda ψ a una de sus componentes no es reversible y no puede, por consiguiente, ser representado por la ecuación de Schrödinger.

El problema de la medida es esencial en mecánica cuántica, no solamente desde el punto de vista físico, sino también desde un punto de vista formal. El punto de vista usual es que la mecánica cuántica no tiene otra solución que postular la coexistencia de dos tipos de evolución irreducibles: la evolución reversible y continua descrita por la ecuación de Schrödinger y la evolución irreversible y discontinua en el instante de la medida. Dicha coexistencia sería irreducible debido a que la evolución reversible no describe una magnitud física, sino una entidad abstracta que contiene las probabilidades de las diferentes medidas y desde ese momento esta evolución no tiene sentido sin la medida irreversible, la cual es incapaz de describir. Las dos evoluciones, reversible e irreversible, son solidarias; el concepto de estado estacionario implica, por definición, la existencia de procesos *intrínsecamente diferentes*. Por tanto, a la mecánica cuántica parecía serle imposible constituir una estructura cerrada y esperar relacionar toda evolución física a una transformación determinista y reversible de un estado equivalente a otro.

Ante estas dificultades, algunos físicos, una vez más, se han refugiado en el subjetivismo, explicando que somos *nosotros*, es decir, *nuestra* medida e incluso, para algunos, *nuestra* mente, quienes determinamos la evolución del sistema frente a la reversibilidad natural «objetiva» [7]. Otros han llegado a la conclusión de que la ecuación de

[7] Sobre estas paradojas, véase los libros de Jammer y de D'Espagnat. De manera notable, todas estas paradojas (el amigo de Wigner, el gato de Schrödinger, los universos múltiples) hacen resurgir cada una a su manera y bajo formas aparentemente

Schrödinger no estaba «completa» y que, por tanto, habría que añadir otros términos que tuvieran en cuenta la irreversibilidad de la medida. Estas dos soluciones, estrechamente paralelas a soluciones análogas propuestas para resolver el problema de la irreversibilidad en mecánica clásica, no son más aceptables en un caso que en otro. El problema adicional planteado en mecánica cuántica, la coexistencia de la reversibilidad y la irreversibilidad, es indicativo del hecho de que la idealización clásica que llevaba a describir el mundo dinámico como «aislado» es imposible en lo que concierne al mundo microscópico. Esto es lo que Bohr recalcaba cuando señalaba que el lenguaje que utilizamos para describir un sistema cuántico no puede separarse de los conceptos macroscópicos que describen el funcionamiento de nuestros aparatos de medida. La ecuación de Schrödinger no describe un nivel fundamental de la realidad; presupone el mundo macroscópico al que pertenecemos.

El problema de la medida en mecánica cuántica representa, por tanto, a nivel de la mecánica cuántica, el problema fundamental, eje de este libro: la relación entre el mundo simple de las trayectorias hamiltonianas y la ecuación de Schrödinger por un lado y el mundo macroscópico en el que vivimos por el otro. En el próximo capítulo veremos que la irreversibilidad clásica comienza cuando la idealización de las trayectorias se hace inadecuada. Se puede dar el mismo tipo de solución al problema de la medida en mecánica cuántica. En esta analogía, la función de onda representa a su vez el conocimiento máximo ideal de un sistema, esta vez un sistema cuántico. Tanto en la física clásica como en la cuántica, el restringirse al objeto ideal de la teoría lleva a ecuaciones de evoluciones reversibles. En ambos casos, la irreversibilidad y el proceso de medida corresponden a situaciones en las que este objeto ideal debe sustituirse en beneficio de los colectivos estadísticos. La razón física de este abandono es la misma en los dos casos: la inestabilidad. Esta es precisamente la cuestión a la cual nos dedicamos ahora.

---

revolucionarias, el eterno resurgir de la teoría «objetiva y cerrada», esta vez bajo el ropaje de la ecuación de Schrödinger. Son las pesadillas de la mente clásica.

Capítulo IX
HACIA LA SINTESIS DE LO SIMPLE Y LO COMPLEJO

1. *En el límite de los conceptos clásicos*

Podemos abordar ahora el problema del choque de doctrinas sobre el que se trataba en el capítulo VII de este libro. El punto muerto al que habían llegado los físicos de finales del siglo XIX, la imposibilidad de dar sentido a la irreversibilidad en un mundo de trayectorias reversibles, sólo es infranqueable si la trayectoria es un concepto irreducible. Esto es lo que pensaban incluso los fundadores de la teoría de colectivos, Einstein y Gibbs, para quienes la función ϱ que representa la densidad en el espacio de fases no era más que una construcción auxiliar, necesaria para tomar en cuenta una ignorancia de *facto* sobre una situación física que estaba determinada de *jure*. Sin embargo, la consideración de este problema adquiere nuevas dimensiones una vez demostrado el hecho de que, para ciertos tipos de sistemas, una determinación infinitamente precisa de las condiciones iniciales, según está implícito en la definición de trayectoria, corresponde a un procedimiento auto-contradictorio. Siendo esto así, el hecho de no conocer jamás una única trayectoria sino un grupo, un conjunto de trayectorias en el espacio de fases, no es solamente una ma-

nera de expresar los límites de nuestro conocimiento efectivo, sino que se convierte en el punto de partida de una nueva manera de concebir la dinámica. Nos encontramos de nuevo ante el problema del paso al límite de una región tan pequeña como queramos en el espacio de fases a un único punto. ¿Es siempre posible este paso al límite? Para saber la respuesta hemos de estudiar la *estructura* del espacio de fases.

En los casos simples, pasar de la función de distribución a un punto no entraña ninguna dificultad. Tomemos el simple ejemplo de un péndulo. Puede oscilar o rotar alrededor de su eje según las condiciones iniciales. Para que rote, su energía cinética debe ser lo suficientemente elevada para que no «caiga» antes de alcanzar la posición vertical. Estos dos tipos de movimiento corresponden a regiones separadas del espacio de fases. La razón para que esto sea así es muy sencilla: la rotación requiere más energía que la oscilación (figura 11). Si nuestras medidas nos permiten asegurar que el sistema está inicialmente en una región dada, podemos predecir con seguridad el tipo de movimiento del péndulo. Podemos aumentar la precisión de nuestros intrumentos y localizar el estado inicial del péndulo en una región más pequeña dentro de la primera, pero esto es com-

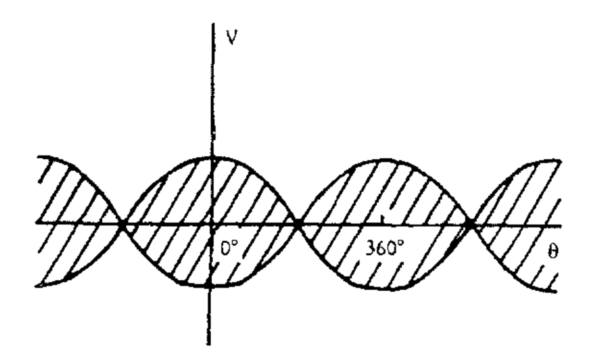


Figura 11. Representación de los movimientos del péndulo en un espacio en donde *V* es la velocidad y *θ* es el ángulo de separación del péndulo con respecto a la posición del equilibrio. Todos los puntos comprendidos dentro de la zona rayada corresponden a los estados pertenecientes a trayectorias oscilatorias, los otros puntos pertenecen a trayectorias de rotación. Estas dos regiones están separadas por dos curvas «separatrices». Un péndulo cuyo estado en un cierto instante pertenezca a una separatriz llegará con una velocidad $V=0$ a la vertical ($\theta=180°$).

parativamente poco importante. Podemos estar seguros de qué comportamiento seguirá el péndulo en todo momento; nada nuevo o inesperado puede ocurrir.

Uno de los resultados más sorprendentes de los estudios de sistemas dinámicos efectuados en el siglo XX, después del ímpetu decisivo dado por Henri Poincaré, es que *esto no es generalmente cierto.* Indiquemos un tipo de trayectoria (por ejemplo, la de la oscilación) por + y otro tipo por *. En lugar de la figura 11, en la que las dos regiones están separadas, uno se encuentra, por lo general, con una mezcla de estados que hace la transición a un punto único ambigua *(figura 12).* Si únicamente sabemos que el estado incial de nuestro sistema está en la región *A*, no podemos deducir que su trayectoria es del tipo +, ya que, igualmente podría serlo del tipo *. No conseguiremos nada aumentando la precisión, pasando de una región a otra más pequeña dentro de la primera, puesto que la incertidumbre se mantiene. *En toda región, tan pequeña como queramos, hay siempre algunos estados pertenecientes a los dos tipos de trayectorias.* Se puede llegar a la siguiente conclusión: para tales sistemas, el concepto de trayectoria se convierte en un *inobservable* en el sentido estricto del término. Esta es una demostración de imposibilidad análoga a la que encontramos en nuestra discusión de la relatividad y de la mecánica cuántica. Expresa los límites de la idealización newtoniana, los límites de la independencia de los dos elementos básicos de la dinámica newtoniana, la ley dinámica y las condiciones iniciales. Aquí se destruye esta independencia: la ley dinámica del sistema hace insostenible el ideal de la determinación de una condición inicial. Cada trayectoria de tipo + está rodeada de trayectorias de tipo *. Se puede pensar en una situación familiar, la de los números de la recta en donde cada racional está rodeado de irracionales y cada irracional de ra-

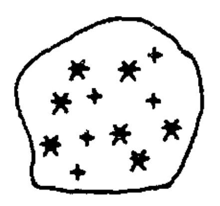


Figura 12. Representación esquemática de una región, arbitrariamente pequeña, del espacio de fases de un sistema débilmente estable. A ella pertenecen estados correspondientes a dos tipos de trayectorias (por lo menos), aquí representadas por + y *.

cionales. Es divertido recordar la forma en que Anaxágoras concebía la riqueza de las posibilidades creativas incluidas en la naturaleza: cada cosa contiene, en cada una de sus partes, una infinita multiplicidad de gérmenes cualitativamente distintos íntimamente mezclados. Aquí también, cada región del espacio de fases guarda una riqueza de posibilidades cualitativamente diferentes que pueden dar lugar a movimientos cualitativamente distintos.

Esta situación de «mezcla íntima» de trayectorias de tipos diferentes se encuentra con frecuencia en dinámica, hasta tal punto que se puede decir que corresponde al caso general. Bajo esta perspectiva, la trayectoria determinista aparece como un concepto de aplicación limitada. En la medida en que somos incapaces, no sólo en la práctica, sino también en la teoría, de describir el sistema por medio de una trayectoria y estamos *obligados* a usar una función de distribución correspondiente a una región finita (tan pequeña como queramos) del espacio de fases, podemos únicamente predecir el futuro *estadístico* del sistema.

Hagamos énfasis en el hecho de que una trayectoria es un concepto «global» que teóricamente se refiere a un período de tiempo arbitrariamente grande. Una trayectoria puede parecer periódica durante un millón de años y de repente dejar de serlo. Podemos, por consiguiente, expresar nuestra conclusión de esta manera: para poder determinar el tipo de trayectoria en un sistema débilmente estable se requeriría un grado de precisión infinito. Desde luego, si pudiéramos observar un sistema dinámico durante un tiempo suficientemente largo, sabríamos qué trayectoria sigue. Sin embargo, observar un sistema por un período ilimitado de tiempo y «predecir» su evolución son, obviamente, actividades *incompatibles*. La asociación de las dos actividades es en sí misma una reducción al absurdo de la idea de predicción determinista.

Nuestro amigo León Rosenfeld solía decir que los conceptos solamente pueden ser entendidos por *medio de sus límites*. En este sentido, podemos ahora comprender mejor la mecánica clásica, cuya formulación preparó el camino a la ciencia moderna.

Pero ¿cómo surgió este nuevo punto de vista? Aquí tenemos que describir los cambios dramáticos sufridos por la dinámica durante este siglo. Esta ciencia, que era considerada como el arquetipo mismo de una rama del conocimiento cerrada y completa, experimentó de hecho una profunda transformación que se esbozará en la siguiente sección.

2. *La renovación de la dinámica*

En la primera parte de este libro dimos una descripción de la dinámica según se formulaba en el siglo XIX y cómo se presenta aún en muchos textos. El modelo del sistema dinámico era el sistema integrable. Para resolver las ecuaciones del movimiento, el método general parecería ser el siguiente: encontrar las coordenadas «buenas» de forma que los momentos correspondientes fueran invariantes del movimiento y, de esa manera, eliminar las interacciones entre las entidades en movimiento.

Este programa sencillo y global no pudo ser mantenido bajo la influencia de dos grandes corrientes ideológicas formuladas en el siglo XIX, pero que no tuvieron pleno desarrollo hasta el siglo XX.

La primera tiene su origen en la teoría cinética de Boltzmann y la teoría de los colectivos de Gibbs. Hemos visto en el capítulo séptimo de este libro que, según la teoría de los colectivos, un sistema se encuentra en equilibrio cuando es representado por un colectivo microcanónico, es decir, cuando la función de distribución ϱ que le corresponde asigna la misma probabilidad de representar a dicho sistema en todos los puntos de una superficie de energía dada. Según este concepto, para que un sistema tienda hacia un equilibrio, la conservación de la energía ha de ser el único invariante durante su evolución: cualesquiera que sean las condiciones iniciales, su evolución debe permitirle alcanzar cualquier punto que posea la misma energía. Sin embargo, para un sistema integrable, la energía está lejos de ser el único invariante (capítulo II, 3). En efecto, la evolución admite tantos invariantes como grados de libertad posee el sistema. Por consiguiente, la trayectoria de un sistema integrable con N grados de libertad no puede abandonar una región del espacio de fases constituida por la intersección de N superficies, cada una de ellas definida por uno de los N invariantes. Por tanto, el sistema se encuentra «prisionero» en una fracción muy pequeña de la superficie de energía constante (figura 13).

Maxwell y Boltzmann introdujeron la idea de un tipo de sistema dinámico completamente distinto, cuya evolución recorría la totalidad de la superficie de energía constante, el sistema «ergódico» (figura 14).

Sólo a partir de los años 1930, con los trabajos de Birkoff, Von Neumann, Hopf, entre otros, la idea de sistema ergódico tomó forma matemática concreta y encontró aplicaciones en las numerosas ra-

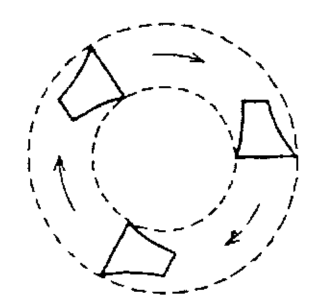


Figura 13. Representación de la evolución típica en el espacio de fases de un volumen inicial que contienen los puntos representativos de un sistema integrable. El volumen inicial conserva su forma y su evolución le mantiene dentro de una región limitada del espacio de fases.

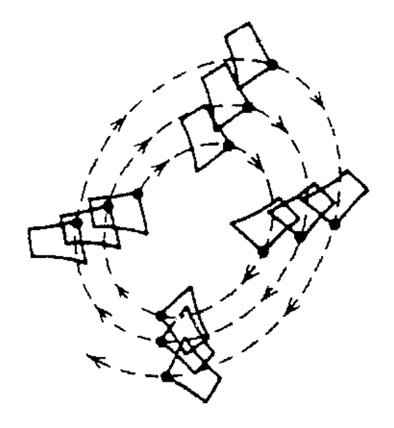


Figura 14. Representación de la evolución típica en el espacio de fases del volumen inicial que contiene los puntos representativos de un sistema ergódico. El volumen conserva su forma pero su trayectoria espiral la hace recorrer la totalidad del espacio.

mas de las matemáticas y la física. Estos trabajos permitieron también definir los sistemas que poseían propiedades aún más fuertes que las del sistema ergódico: los sistemas «mezcladores». Al igual que un sistema ergódico, un sistema mezclador no sólo recorre la totalidad de la superficie de energía constante, sino que además se extiende hasta cubrirla uniformemente [1] (figura 15).

[1] Para un planteamiento general, consultar Lebowitz, J., y Penrose, O., «Modern Ergodic Theory», en *Physics Today*, febrero 1973, pp. 23-29. Para un estudio más de-

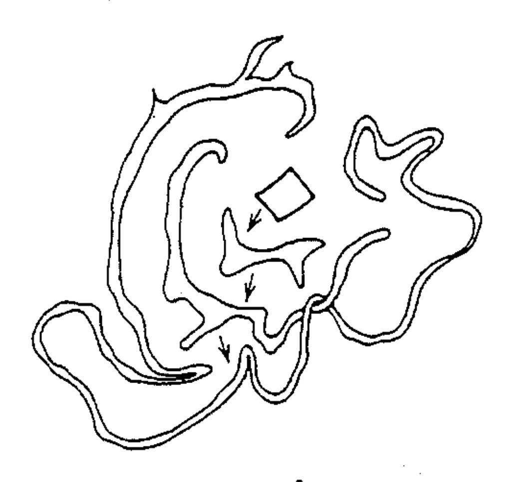


Figura 15. Representación de la evolución típica en el espacio de fases del volumen inicial que contiene los puntos representativos de un sistema mezclador. El volumen se conserva pero se deforma y estira poco a poco a través de todo el espacio.

Tomemos un sistema mezclador cuya condición inicial está localizada en una pequeña región del espacio de fases. Durante su evolución, veremos esta región girar y retorcerse y, como si fuera una ameba, enviar «pseudópodos» en todas direcciones, extendiéndose en filamentos cada vez más finos y atormentados hasta que finalmente invade todo el espacio. Ningún bosquejo puede hacer justicia a la complejidad de la situación real. En efecto, durante la evolución dinámica de un sistema mezclador, dos puntos tan cercanos como se quiera en el espacio de fases, pueden dirigirse en direcciones distintas. Incluso si poseemos mucha información sobre el sistema y la región inicial formada por sus puntos representativos es muy pequeña, su evolución lleva a dicha región a convertirse en un auténtico «monstruo» geométrico que extiende su red de tenues filamentos a través del espacio de fases.

Tomemos un ejemplo que nos permita comprender la situación a la que llegamos y que caracteriza una coexistencia notable del «azar» y de la «necesidad». Este ejemplo, puramente matemático, es algo simplificado, pero muy interesante. Se trata de una transformación

tallado, véase Balescu, R., *Equilibrium and Non-equilibrium Statistical Mechanics,* Nueva York, Wiley, 1975.

que, por obvias razones de analogía, los matemáticos denominan «transformación del panadero» [2]: empezando con un cuadrado, primero lo aplastamos, como haría un panadero, para formar un rectángulo; entonces doblamos el rectángulo por la mitad para formar de nuevo un cuadrado. Este conjunto de operaciones se muestra en la figura 16 y puede ser repetido cuantas veces queramos y cada vez la superficie del cuadrado es fragmentada y redistribuida. Si el cuadro en cuestión constituye el espacio de fases vemos que la transformación del panadero lleva cada punto a un nuevo punto bien definido. La figura 17 muestra un ejemplo de la serie de puntos inducida por la transformación del panadero obtenida empezando a partir de un punto inicial. Aunque la serie de puntos obtenida de esta manera es

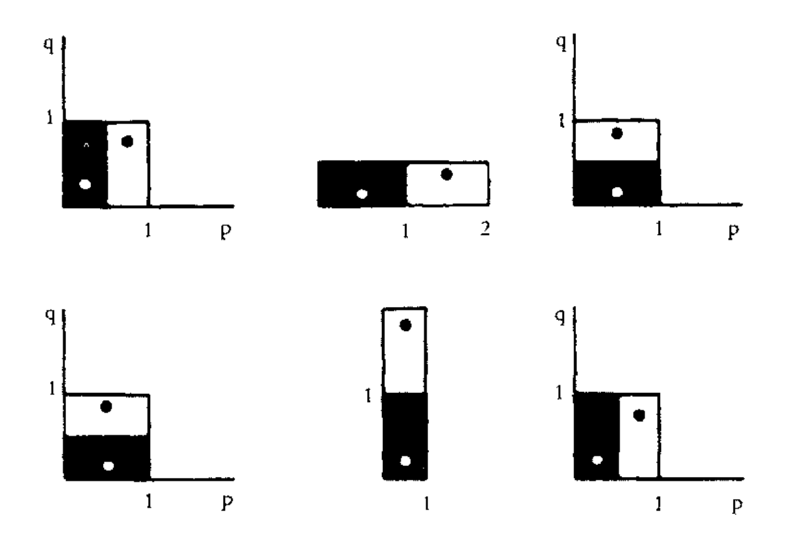


Figura 16. Etapas de la transformación del panadero *(B)* y de la transformación inversa (B_{-1}). Los dos puntos nos permiten hacernos una idea de la transformación.

$Bj(P,q)=j(2p,q/2)$, *si* $0 \leq p < 1/2$
$\quad = j(2p-1,\ q/2+1/2)$, *si* $1/2 \leq p < 1$

$B_{-1}\ j(p,q)=j(p/2,2q)$, *si* $0 \leq q < 1/2$
$\quad = j(p/2+1/2,2q-1)$, *si* $1/2 \leq q < 1$.

---

[2] Arnold, V. I., y Avez, A., *Problèmes ergodiques de la mécanique classique*, París, Gauthiers Villars, 1967.

determinista, el sistema exhibe además aspectos estadísticos irreducibles. Tomemos, por ejemplo, un sistema descrito por una condición inicial tal que una región A del cuadro se encuentra iniciado uniformemente llena de puntos representativos. Puede demostrarse que tras un número suficiente de repeticiones de la transformación, esta superficie, *cualquiera que sea su tamaño y localización,* se encontrará rota en pedazos. La cuestión esencial es que cualquier región, cualquiera que sea su tamaño, de este modo siempre contiene trayectorias distintas que divergen en cada fragmentación. Cuando la evolución de un punto es reversible y determinista, la descripción de una región, no importa lo pequeña que sea, es básicamente estadística, sólo podemos hablar de la probabilidad de que un sistema cuya condición inicial corresponde a una región, siga tal o cual tipo de trayectoria.

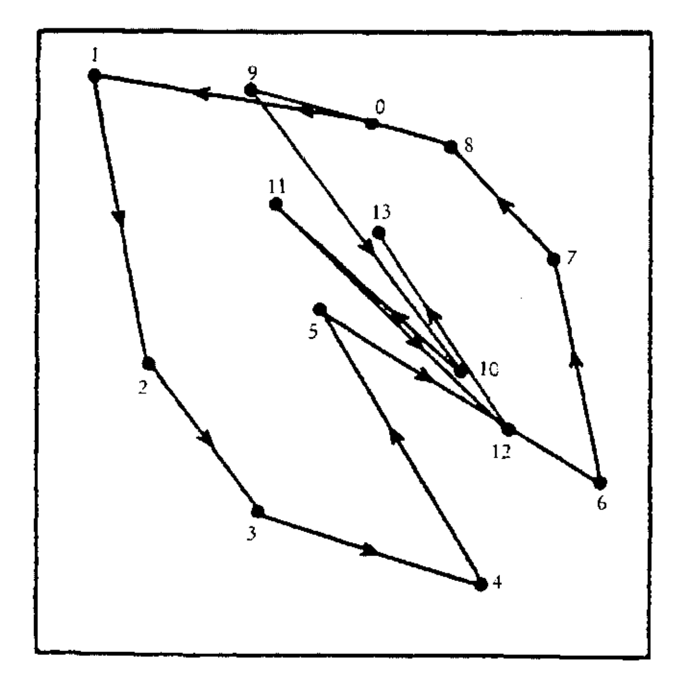


Figura 17. Posiciones sucesivas de un punto situado inicialmente en (p=0,5456 y q=0,8558, durante trece transformaciones del panadero; las líneas son solamente interpolación.

Los sistemas mezcladores no son los únicos que manifiestan propiedades estadísticas. Y el segundo conjunto de trabajos que ha conducido a abandonar el sistema integrable tuvo por marco el más clásico de los problemas de la dinámica, el problema de la mecánica celeste y, más exactamente, el problema «de los tres cuerpos». El sistema formado por el Sol, la Tierra y la Luna es un ejemplo de sistema de tres cuerpos. El sistema de dos cuerpos, la Tierra y la Luna, es un sistema integrable: se puede definir un hamiltoniano que, después de las transformaciones apropiadas, no depende ya de las posiciones de los dos cuerpos, sino únicamente de dos «momentos» J_1 y J_2, que son dos invariantes. Pero si intentamos dar cuenta de la influencia del Sol sobre las posiciones relativas de la Tierra y de la Luna, debemos introducir nuevas interacciones y, por tanto, en un último análisis, un nuevo hamiltoniano de forma $H{=}H_2\ (J_1, J_2){+}\lambda H_3$. Sin embargo, los trabajos de Poincaré ponen en evidencia que este nuevo hamiltoniano, por débil que sea la constante de acoplamiento λ, es susceptible de introducir una perturbación mayor en la estructura del espacio de fases. Los invariantes J_1 y J_2 del problema de dos cuerpos son generalmente destruidos y el sistema no admite ya otros invariantes que el propio H. Ciertamente, algunos movimientos conservan su carácter: el Sol no impide a la Luna mantener una trayectoria periódica; pero se hacen posibles otros tipos de trayectorias y no se puede excluir la perspectiva de que un día una trayectoria hasta entonces periódica se aleje hacia el infinito. A la larga, ¿es estable el sistema planetario? Esta es una pregunta a la cual la dinámica *no puede responder con certidumbre.*

Podemos denominar al descubrimiento de Poincaré de finales del siglo XIX «catástrofe de Poincare» [3]. Investigaciones mucho más recientes de Kolmogoroff (1954), Arnold y Moser han ampliado estos primeros trabajos y sentado las bases de una teoría general de los sistemas no integrables [4].

Hay que subrayar un punto importante. Ya se trate de sistemas no integrables de los que acabamos de hablar, o de sistemas mezcladores, en ambos casos, los sistemas se caracterizan por la *inestabili-*

---

[3] Poincaré, H., *Les Méthodes nouvelles de la mécanique céleste,* Nueva York, Dover, 1957, y Whittaker, E. T., *A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies,* Cambridge, University Press, 1937 (reimpreso en 1965).

[4] Moser, J., *Stable and Random Motions in Dynamical Systems,* Princeton, University Press, 1974.

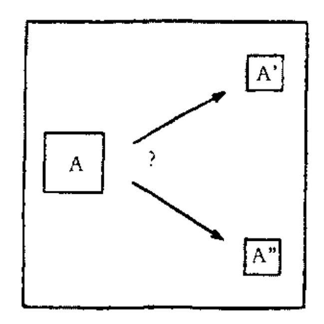


Figura 18. Tras la fragmentación de la superficie *A*, no es posible saber de manera determinista en cuál de los fragmentos se encuentra un sistema que inicialmente estaba en *A*.

dad de sus trayectorias, la mezcla íntima de los distintos tipos de trayectorias en *cualquier* región, por pequeña que sea, del espacio de fases. En los dos casos, la operación del paso del colectivo a la trayectoria individual *no puede efectuarse*, nuestro conocimiento se limita a la función de distribución ϱ. En los dos casos, la descripción en términos de colectivos no puede reducirse más, y *debe* servir de punto de partida. Los conceptos estadísticos ya no son una aproximación a una «verdad objetiva», sino la única herramienta teórica disponible. Cuando nos enfrentamos a los sistemas no integrables, o a los mezcladores, el diablillo de Laplace es tan impotente como nosotros y no se encuentra «más cerca» de una descripción determinista. El diablillo de Laplace está muerto por no ser ya, como observador preciso, el signo de aquello hacia lo que puede dirigirse la descripción física.

El dicho de Einstein «Dios no juega a los dados» es bien conocido y Poincaré también ha recalcado que no puede haber juego de azar para un matemático supremo. Sin embargo, el mismo Poincaré indicó la dirección en la cual la solución a este problema puede ser encontrada [5]. Según lo hizo notar, se puede precisar la idea de azar: cuando se tira un dado se puede hablar de probabilidad porque, a partir de cada intervalo de condiciones iniciales arbitrariamente pequeño, hay *igual* número de trayectorias que llevan a cada una de las ca-

[5] H. Poincaré, «Le Hasard», en *Science et méthode*, París, Flammarion, 1914, p. 65.

ras del dado. Esto es precisamente lo que sucede de forma más general con los sistemas dinámicos inestables. Dios podría, si quisiera, calcular las trayectorias en un mundo dinámico inestable y obtendría el mismo resultado al que nosotros llegamos gracias al cálculo de probabilidades, a menos que no haga uso de sus cualidades de omnisciencia absoluta y sobrenatural, que no permiten representar ningún paso al límite a partir de nuestras facultades y a menos que El parta de una condición inicial *infinitamente* exacta.

3. *De las fluctuaciones al devenir*

¿Cómo se presenta, en esta nueva perspectiva, el problema del devenir? Acabamos de ver que la inestabilidad de ciertos sistemas dinámicos nos impone una descripción estadística, incluso dentro del marco de la mecánica clásica. Este resultado es tan interesante que numerosos científicos, confundidos por los aspectos estadísticos de la mecánica cuántica, intentaron restablecer la normalidad clásica, el determinismo. Ahora parece que esta normalidad es un caso muy particular.

Ha llegado el momento de utilizar el lenguaje de los operadores para hacer explícitas las nuevas propiedades de los sistemas dinámicos inestables. En efecto, hemos visto que los operadores pueden introducirse cuando se abandona la descripción dinámica completa, en términos de trayectorias, por una descripción que sólo puede ser estadística. Hemos dicho que operadores como ∂/∂_p y ∂/∂_q, por ejemplo, podían introducirse para actuar sobre una función de distribución ϱ. Pero para los sistemas de estabilidad fuerte puede abandonarse la descripción mediante la función de distribución, y también los operadores, en beneficio de la descripción determinista. Por el contrario, la inestabilidad proporciona a los sistemas dinámicos un carácter aleatorio irreducible y los operadores jugarán en la descripción un papel que no podrá eliminar el paso a una descripción determinista.

Conocemos ya un operador que actúa sobre una función de distribución clásica, el operador de Liouville [6], que da la evolución en el tiempo de esta función: $i\partial\varrho/\partial t = L\varrho$. Ya hemos mencionado la analogía de esta ecuación con la ecuación de Schrödinger. En la perspec-

[6] El operador L tiene la forma $L = i(\partial H/\partial q\ \partial/\partial p - \partial H/\partial p\ \partial/\partial q)$.

tiva tradicional de la dinámica, el operador L mantiene con el hamiltoniano la misma relación que la función ϱ con la trayectoria. Cada vez es un tipo de relación de dependencia de alguna cosa más «real», más «objetiva». Sin embargo, en el caso de los sistemas inestables, no debe considerarse L como una construcción deducible de la dinámica hamiltoniana, sino como un concepto primario. Entonces podemos preguntarnos, lo que no tendría sentido alguno en un marco hamiltoniano, si no es posible introducir otros operadores que tengan un significado físico importante. En particular, el operador L, como lo indica la ecuación de Liouville, está unido al cambio $\partial/\partial t$, ¿no se podría encontrar también un operador asociado al tiempo? La introducción de este operador permitiría un nuevo planteamiento de las relaciones «ser» descrito por él y del «devenir» descrito por el operador L, por la misma razón lógica que entraña la no-conmutabilidad de las parejas de operadores q, $\partial/\partial q$ y p, $\partial/\partial p$.

De hecho, estamos familiarizados con sistemas en los que el devenir es, por definición, no-deducible de la descripción, por detallada que ésta sea, de un estado instantáneo. Son los juegos de azar, los dados de los que ya hemos hablado, o la ruleta: en todos los casos la evolución del sistema, la trayectoria de la bola o del dado, no pueden predecirse con certidumbre sobre la base de la situación inicial.

Los trabajos de nuestro grupo, y en particular los de Misra, permiten responder afirmativamente a la pregunta formulada [7]. Podemos introducir un operador «tiempo» o «edad», que simbolizaremos como T, con la condición (necesaria) de que la función de distribución ϱ sea irreducible, que no pueda abandonarse por una descripción en términos de trayectorias. Pero antes de avanzar más en el análisis de esta extensión de la dinámica, volvamos al ejemplo de la transformación «del panadero» que ya hemos introducido, con el fin de mostrar cómo se puede definir la edad de un sistema.

Consideremos una función definida sobre el cuadrado formado por el espacio de fases del panadero. Podemos considerar, en particular, funciones en este cuadro que sólo toman valores, $+1$, -1, y tales que la suma de estos valores sobre el cuadrado es cero. Tales funciones se denominan por definición «particiones». En la figura 19 vemos una partición que corresponde a dos rebanadas. Toma el va-

[7] Para una exposición más detallada y otras referencias sobre lo que sigue, véase Prigogine, I., *From Being to Becoming*, San Francisco, Freeman, 1980 (trad. *Physique, temps et devenir*, Masson, 1982).

lor de −1 en la mitad inferior del cuadrado, +1 en la mitad superior. Podemos aplicar a esta partición la transformación del panadero y verificar, usando las reglas ilustradas en la figura 16, que obtenemos una partición correspondiente a cuatro rebanadas. Desde luego, podemos continuar de esta manera y obtener particiones cada vez más fragmentadas.

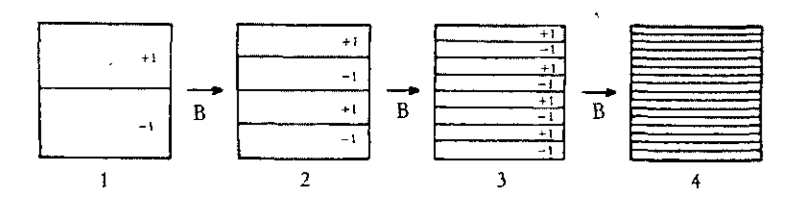


Figura 19. Aplicación de tres transformaciones del panadero sucesivas.

¿Cómo asociar un tiempo, esta vez un tiempo interno, a las particiones? Es natural afirmar que la partición correspondiente a dos rebanadas es «más joven» que la partición correspondiente a cuatro. De esta forma, la noción de edad se encuentra asociada al estado de fragmentación, es decir, precisamente a una propiedad intrínseca del sistema considerado. Citemos aquí, aunque no demostremos, una propiedad importante: existe un conjunto de particiones a las que podemos llamar particiones fundamentales, tales que todas las particiones sobre el cuadrado se pueden obtener a partir de estas particiones fundamentales por medio de la aplicación de un número arbitrario k, que puede ser positivo o negativo, de la transformación del panadero. Se encontrará en las figuras 20, 21 y 22 varios esquemas en los que se asigna el valor +1 a los puntos de la zona negra y el valor −1 a los puntos de la zona blanca. La partición X_0 es, por tanto, idéntica a la partición «en dos rebanadas» de la figura 19. La figura 20 muestra el paso al medio de la transformación del panadero y de su inversa, de la partición fundamental X_0 a las particiones X_1, X_2, X_{-1}, X_{-2}, etc. La figura 21 muestra cómo se pueden obtener otras particiones fundamentales más complejas a partir de X_0, particiones que no son «a rebanadas» que conservan las dos propiedades necesarias: toman solamente dos valores, +1 y −1, y la suma de estos valores sobre todos los puntos del cuaderado es cero. La figura 22 muestra la manera en que las transformaciones del panadero y sus inversas ha-

cen evolucionar a una partición más compleja de este tipo. Todas las particiones representadas en las figuras 20 y 22 tienen una edad bien definida, calculable por el número de transformaciones que se ha de aplicar a una partición fundamental para obtenerlas.

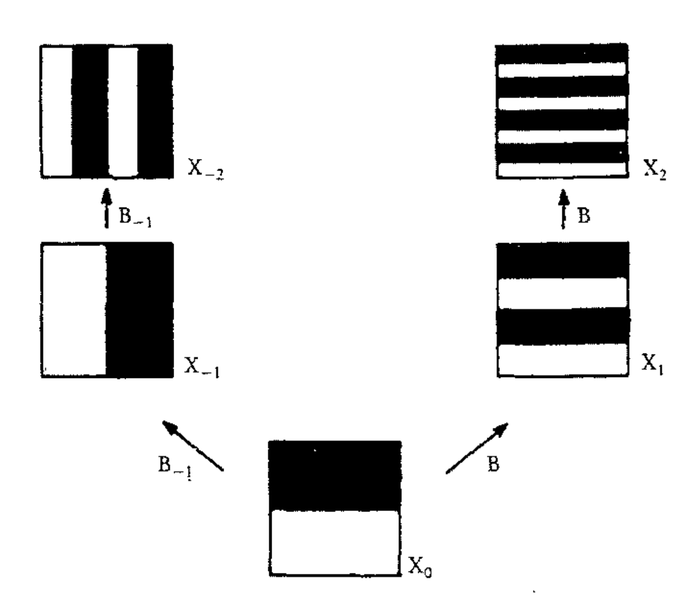


Figura 20. Modificaciones por transformaciones del panadero y transformaciones inversas de una partición fundamental X_0.

¿Por qué nos hemos detenido en el estudio de las particiones? Porque el concepto de edad, que se introduce de forma muy natural, puede fácilmente extenderse a partir de ahí al caso general de una función de distribución estadística definida en el espacio de fases. Sin embargo, debemos tener en cuenta que, contrariamente a la partición, que sólo puede tomar los valores +1 y −1, la función de distribución puede tomar todos los valores positivos o nulos (ϱ es una probabilidad) con la única condición de que la suma sobre el cuadrado sea igual a la unidad. Las particiones no pueden, por tanto, ser distribuciones, pero podemos pasar fácilmente de un concepto al otro. En efecto, descompongamos ϱ en una parte de equilibrio, de valor

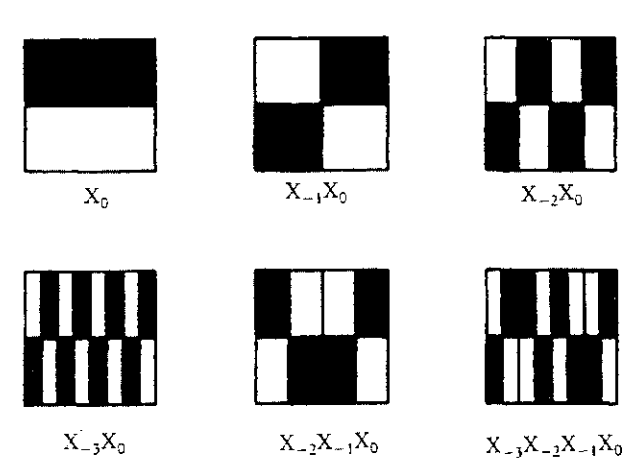
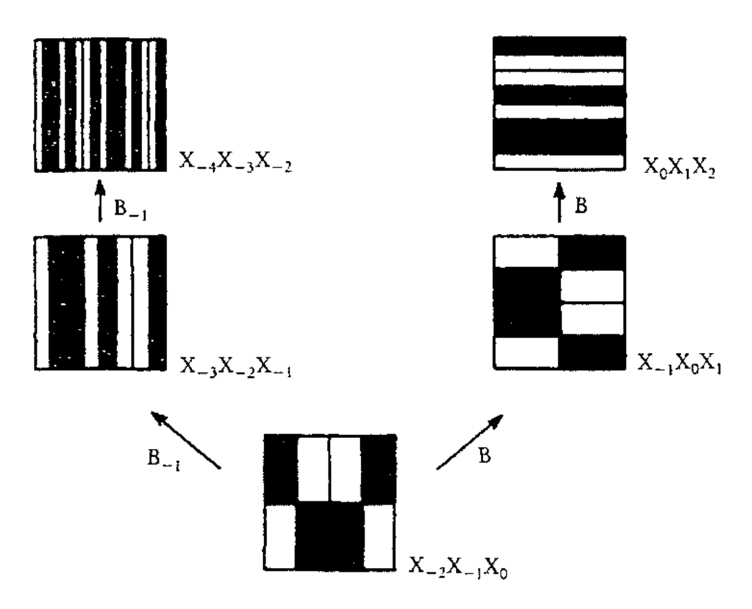


Figura 21. Algunas particiones fundamentales obtenidas por multiplicación de la partición X_0 por sus transformadas X_{-1}, X_{-2}, X_{-3}, etc. Las reglas de la multiplicación son las de la aritmética, para el blanco $= -$ y para el negro $= +$ ($+ \cdot - = - \cdot + = -$; $- \cdot - = + \cdot + = +$).



Figuras 22. Modificaciones por B y B_{-1} de la partición fundamental X_{-2}, X_{-1}, X_0.

uniforme sobre el cuadrado (valor que tomaremos igual a 1, ya que, en este caso sencillo, la superficie del espacio de fases es igual a 1) y en una parte de exceso, $\bar{\varrho}$. De ahí $\varrho=1+\bar{\varrho}$. El exceso $\bar{\varrho}$ puede, al contrario que ϱ, ser tanto negativo como positivo, a condición de que ϱ cumpla las condiciones implícitas (lo cual implica que la suma de los $\bar{\varrho}$ sobre el cuadrado es cero). Por tanto, a cada partición puede corresponderle un $\bar{\varrho}$, y estos $\bar{\varrho}$ tendrán una edad bien definida: la de la partición. Podemos igualmente atribuir esta edad a la función de distribución completa $\varrho(=1+\bar{\varrho})$ correspondiente. Así, supongamos que la distribución de exceso $\bar{\varrho}$ viene dada por la partición 1 de la figura 19. Obtenemos para la función ϱ la repartición indicada en la figura 23. Y se trata de una función estadística, ya que ϱ es en todas partes positivo o nulo, y la suma sobre el cuadrado da 1. De la misma forma, partiendo de la partición 2 de la figura 19, obtenemos la distribución estadística representada por la figura 24.

Las distribuciones de las figuras 23 y 24 indican una edad bien definida: la de las particiones a las que corresponden las distribuciones de exceso. La edad de la distribución de la figura 23 es 1, la de la distribución 24, 2. Sin embargo, el problema no está resuelto, porque toda *función de distribución de exceso no corresponde a una partición de edad bien definida.* Podemos construir los $\bar{\varrho}$ combinando particiones de edades distintas.

Podemos, por ejemplo, considerar para ϱ la semisuma de las particiones 1 y 2 de la figura 19. Esto lleva la partición a la función representada en la figura 22. La distribución ϱ construida de esta manera satisface todos los requerimientos, pero está hecha a partir de dos partes de edades distintas. Podemos únicamente hablar de su *edad promedio.* Es precisamente esta situación la que requiere la introducción de la edad interna como un operador y no como un número. Ya hemos visto, en el capítulo dedicado a la mecánica cuántica, que un operador se caracteriza por sus funciones propias y valores propios. Las particiones fundamentales corresponden a las funciones propias de T con valor propio 1; las particiones obtenidas por medio de k aplicaciones de la transformación del panadero son las funciones propias de valor propio $k+1$. Estas son las reglas fundamentales que rigen la construcción del operador T.

Si consideramos ahora la función de distribución ϱ (o más bien el exceso $\bar{\varrho}=\varrho-1$), después de lo que acabamos de ver, puede ser o no una función propia de T. Las distribuciones correspondientes a las figuras 23, 24 son efectivamente funciones propias correspondien-

tes a los valores propios 1 y 2. La de la figura 25 no lo es, corresponde a una mezcla de estados de edad 1 y 2.

Aunque una distribución ϱ no tenga, en general, una edad definida, podemos escribirla como una superposición de partes que sí tienen cada una una edad definida. Entonces podemos hablar de una edad media $<T>$ de la distribución y de fluctuaciones de edad ligadas a $<T^2>-<T>^2$. La edad cronológica, la edad de la dinámica, es una edad convencional; aquí asistimos, en un ejemplo sencillo pero significativo, a la génesis de una edad interna unida al estado de un sistema.

Desde luego, no nos habríamos detenido en este punto sobre el ejemplo gracioso, pero esquemático, del panadero, si no estuviéramos convencidos de que el tiempo interno que él nos permtie descubrir existe también para una clase más general de sistemas. De he-

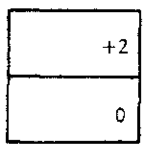


Figura 23. Función de distribución construida con una partición de edad de 1.

+2
0
+2
0

Figura 24. Función de distribución construida con una partición de edad de 2.

+2
+1
+1
0

Figura 25. Función de distribución construida superponiendo una partición de edad 1 y otra de edad 2.

cho, aunque aún no hayamos podido demostrarlo, creemos que todos los sistemas químicos (y, *a fortiori*, todos los sistemas biológicos) poseen una inestabilidad dinámica comparable a la del panadero: pequeños cambios en las condiciones iniciales pueden alterar la posibilidad de transformaciones químicas.

El ejemplo del panadero permite captar el punto importante: la coexistencia de elementos deterministas (la trayectoria) y elementos estadísticos irreducibles (evolución de regiones en el espacio de fases). Esta coexistencia nos permite definir el nuevo operador tiempo que actúa sobre las funciones de distribución. Al pensar en los operadores, debemos plantearnos la cuestión de su conmutación y de las relaciones de incertidumbre que conllevan. Hemos visto que en mecánica cuántica la cantidad de movimiento p y la coordenada q obedecen a una relación de incertidumbre, la célebre relación de Heisenberg. Esta relación no se extiende al tiempo, que suele ser un número, tanto en mecánica clásica como en mecánica cuántica. ¿Podemos salvar, gracias a este nuevo operador, una etapa adicional e introducir una relación de incertidumbre que una esta vez el tiempo y el devenir? Un argumento cualitativo permite comprender que es así. Basta acercar la pareja de operadores de Liouville L, que expresa el cambio $\partial/\partial t$, y el operador T del tiempo, las parejas q, $\partial/\partial q$ y p, $\partial/\partial p$ que, como ya hemos visto (capítulo VIII, sección 4), no conmutan. Se puede verificar que $LT-TL=1$. Es la nueva relación de incertidumbre que buscamos.

Nos encontramos, por consiguiente, frente a dos conceptos de tiempo, el tiempo asociado a una trayectoria, el que leemos en nuestros relojes, externo a nuestro organismo y a todo ser natural, que nos sirve para medir y para comunicarnos y, por otra parte, el tiempo interno, que en el caso del panadero se mide por el grado de fragmentación de las particiones y que en el caso de los organismos vivientes podría, sin duda, aproximarse al concepto de «edad biológica». Desde luego, estos dos tiempos no pueden ser independientes y, de hecho, no lo son. En el caso del panadero, por ejemplo, podemos repetir la transformación cada segundo. Una partición correspondiente a la edad k se transformaría en una de edad $k+1$. La función de distribución puede ser o puede no ser un valor propio de T. En ambos casos su edad media aumentará también cada segundo una unidad. En el caso continuo la situación permanece idéntica. El incremento del tiempo «cronológico» dt es igual a la variación del tiempo interno medio $d\langle T\rangle$.

Hemos citado en la introducción de este libro las célebres palabras de Newton y las de Bergson acerca del tiempo. Podríamos decir ahora que, en un sentido, los dos tenían razón. Como afirmaba Bergson, hay otros tiempos además del que muestra el reloj, pero fluyen «juntos» para definir un devenir universal.

Una vez definido el nuevo tiempo interno, podemos ir aún más lejos y, en particular, introducir otro operador que corresponderá a una «entropía» microscópica, cuyo valor medio generará el tiempo termodinámico. Esto es lo que haremos ahora y así llegaremos a realizar la ambición de Boltzmann: proporcionar un sentido dinámico preciso al segundo principio de la termodinámica.

4. *Una complementariedad ampliada*

En la sección anterior hemos formulado una relación de incertidumbre entre la evolución temporal y la definición de la edad del conjunto. Ella implica, por una parte, el operador de Liouville L y, por otra, el nuevo tiempo interno, correspondiente al operador T. Como ya hemos subrayado, este operador tiempo no siempre existe. La condición de inestabilidad correspondiente a una mezcla íntima de trayectorias es esencial. En caso de que se cumpla esta condición, asistimos a una ampliación conceptual del marco de la dinámica, a una dinámica de funciones de distribución y de operadores que actúan sobre ellas y no a la dinámica de trayectorias. La descripción de los sistemas simples que constituían el modelo de la dinámica del siglo XIX, el péndulo, el oscilador, el movimiento planetario, no ha sido modificada, sino que permanece ligada a la idea de trayectoria, con todo lo que ello comprende: determinismo, legalidad, reversibilidad. En este caso, nada nos impide pasar de la distribución en el espacio de fases a una trayectoria única y no hay más tiempo que el tiempo de la trayectoria. Sin embargo, el caso general corresponde a los sistemas en los que no puede invocarse la trayectoria única: la única descripción posible es, por tanto, una descripción estadística en términos de funciones de distribución.

De este modo le quitamos la razón a Voltaire, que, de manera muy espiritual, escribía en el artículo *Destin* de su *Dictionnaire Philosophique:*

...todo está gobernado por leyes inmutables, ...todo está predispuesto, ...todo

es un efecto necesario... Hay alguna gente que, asustada por esta verdad, la admite sólo a medias, como deudores que ofrecen a sus acreedores pagar la mitad de su deuda, pidiendo más tiempo para pagar el resto. Hay, dicen, sucesos que son necesarios y otros que no lo son. Sería divertido si una parte de lo que pasa tuviera que pasar y otra parte de lo que pasa no tuviera que pasar...

...Yo, necesariamente, debo tener la pasión de escribir esto y tú la pasión de condenarme; ambos somos igualmente tontos, ambos juguetes en manos del destino. Tu naturaleza es hacer el mal, la mía es amar la verdad y publicarla a pesar tuyo.

Por convincentes que puedan sonar, los argumentos *a priori* nos puede llevar por el camino equivocado. El razonamiento de Voltaire es newtoniano: la naturaleza siempre se ajusta a sí misma. Pero, curiosamente, hoy en día nos encontramos en el «divertido» mundo sugerido por Voltaire; nos quedamos atónitos al descubrir la diversidad cualitativa de las situaciones que la naturaleza nos presenta.

Volvamos ahora a nuestro problema de partida, el problema de Boltzmann, la definición de una entropía, pero en el nivel microscópico. Hemos discutido las dificultades a las que se enfrenta el problema: la entropía microscópica no puede ser una simple función de coordenadas y momentos, ni una función de ϱ en el espacio de fases.

La discusión del tiempo operador, en la sección anterior, nos abre una posibilidad totalmente distinta: asociar la entropía macroscópica con un *operador* microscópico. ¿Cuál es el significado de tal proposición? Se trata ante todo de un vínculo más sutil entre ϱ y la entropía microscópica. Del mismo modo que, para buscar la probabilidad de un valor de un observable en mecánica cuántica se ha de desarrollar la función de onda en una superposición de las funciones propias de este observable (capítulo VIII, sección 5); para asociar una entropía a una distribución ϱ, hay que descomponer esta distribución en «funciones propias» de la entropía. La distribución ϱ no corresponde generalmente a un valor bien definido de la entropía (superposición reducida a una sola función propia), sino solamente a su valor medio, como en el caso de T.

¿Qué debemos pedir a este operador de entropía que denominaremos M? Una exigencia esencial, que no conmute con el operador de Liouville, porque en ese caso sería un invariante del movimiento. Esto queda excluido, porque M permite caracterizar la irreversibilidad de un proceso, la evolución de la función de distribución hacia el equilibrio libre por el *aumento* del fraccionamiento del volumen

inicial, hasta que todos los puntos de la superficie microcanónica tengan la misma probabilidad de representar el sistema (la función de distribución posee, por tanto, el mismo valor en cada uno de sus puntos). La misma función no puede ser al mismo tiempo función propia de L y de M. Además, la relación de conmutación entre L y M debe permitir definir una producción microscópica de entropía, que ha de tener un signo bien definido. Llegamos así a una nueva relación de incertidumbre, una complementariedad ampliada, $ML-LM \neq 0$. Como antes, complementariedad significa fluctuaciones y, de nuevo, sólo podemos construir este operador en los sistemas que poseen elementos aleatorios irreducibles, de los que la transformación del panadero nos ha proporcionado un ejemplo.

Existe una estrecha relación entre la construcción de T, ya explicada, y la de M. Si T existe, M existe también: para tener una entropía microscópica, es suficiente una función $M(T)$ positiva, que decrezca de manera monótona a medida que aumenta el fraccionamiento medio por T. Por tanto, todos los sistemas que admiten este segundo tiempo T, este tiempo fluctuante, obedecen al segundo principio de la termodinámica. Sin embargo, a la inversa no es verdad, M puede existir sin que se pueda definir T, pero aquí no podemos entrar en esas cuestiones.

Uno de los puntos esenciales de esta solución del problema de la irreversibilidad es que las respuestas que la dinámica clásica había obtenido *efectivamente* —la descripción de los sistemas integrables en particular— permanecen intactas. Simplemente se engloban como casos particulares en un conjunto más vasto. Así llegamos a hacer compatibles dos cosas: la validez de la dinámica está garantizada por un conjunto de experiencias muy precisas, pero, por otra parte, también es verdad que la irreversibilidad está ahí y desempeña un papel constructivo esencial en la naturaleza.

5. *Una nueva síntesis*

Las herramientas que acabamos de presentar nos permiten proceder ahora a una síntesis de los diferentes puntos de vista. Hemos visto que la entropía corresponde a un *atractor*. El estado máximo de entropía «atrae» a todo sistema aislado que se encuentre en otro estado, de entropía menor. La termodinámica de los fenómenos irreversibles ha precisado en términos de magnitudes macroscópicas la

naturaleza de esta atracción —es el contenido del término de producción de entropía el que se expresa como una función de flujos (por ejemplo, flujo de calor) y de fuerzas (por ejemplo, gradientes de temperatura). Se planteó la cuestión de saber si podemos ir más lejos, interpretar al atractor en términos de magnitudes microscópicas.

El admirable intento de Boltzmann solamente condujo a un éxito parcial y los intentos de generalizarlo con la ayuda de los colectivos de Gibbs parecía llevar a un punto muerto. Ahora vemos que las dificultades provenían sobre todo de una comprensión incompleta de la dinámica. Una vez separados los conceptos de inestabilidad y de complejidad de la evolución dinámica al nivel del espacio de fases, desaparecen los obstáculos.

Ya hemos dicho que los grandes temas de la ciencia clásica giran en torno a la convicción de que lo microscópico es simple. Esta convicción ha sido destruida en dos ocasiones. La primera vez, por el descubrimiento de que la simplicidad dinámica pertenece de hecho al mundo macroscópico, que no es atribuible al fenómeno cuántico, sino por medio de nuestros instrumentos. La segunda, por el descubrimiento de que raros son, en mecánica, los casos en los que la evolución dinámica es lo bastante sencilla para admitir la idea de trayectoria. El operador microscópico de entropía puede construirse allí donde, en este último sentido, lo microscópico deja de ser simple.

De la misma forma que hemos pasado del operador tiempo a un tiempo medio, podemos pasar del operador M a $\mathcal{H}$ que definimos como la integral $\mathcal{H}=\int \varrho M \varrho dqdp$. Esta magnitud tiene las propiedades de la función $\mathcal{H}$ de Boltzmann; disminuye hasta que el mismo alcanza un estado de equilibrio. Observemos que esta definición no es única. Volveremos sobre esto.

La función $\mathcal{H}$ introducida por Boltzmann poseía una propiedad que parece haber perdido la magnitud que acabamos de construir; $\mathcal{H}=\int f \ln f dv$ no dependía de la dinámica, sino solamente del estado instantáneo del sistema tal como lo describe la función de distribución de velocidades, mientras que M depende de la dinámica de los procesos que ocurren en el sistema. De hecho, podemos dar al atractor $\mathcal{H}$ una forma tan universal como la del $\mathcal{H}$ de Boltzmann. Pero sólo podemos hacerlo abandonando la representación canónica de la dinámica hamiltoniana, redefiniendo una función de distribución $\tilde{\varrho}$ por una transformación *que no es ya una transformación canónica*, que no conserva la forma hamiltoniana de las ecuaciones de movimiento.

Ahora comprendemos en dónde se situaba Boltzmann: pensaba

en una descripción extraña a la representación clásica, por eso la ecuación de evolución de su función de distribución f posee una simetría extraña a la de las ecuaciones dinámicas. El postuló una representación que ahora podemos obtener por una transformación extraña a la dinámica hamiltoniana (transformación «no unitaria»), que convierte la función ϱ en una nueva función $\tilde{\varrho}$. Esta transformación es generada por un operador $\wedge$, $\tilde{\varrho}=\wedge\varrho$ ligado a M por la relación $M=\wedge^2$. La ecuación de evolución de $\tilde{\varrho}$ posee la simetría postulada por Boltzmann. Gracias a $\tilde{\varrho}$, obtenemos un atractor de forma universal $\mathcal{H}=\int(\tilde{\varrho})^2 dpdq$ [8].

Como ya hemos indicado, la expresión del atractor en términos de $\tilde{\varrho}$ no es única. Podemos tomar también la expresión cercana a la de Boltzmann, $\mathcal{H}=\int\tilde{\varrho}Ln\tilde{\varrho}\, dpdq$. Esta vez, se ha cubierto la zanja existente entre Boltzmann y la dinámica, no mediante un procedimiento de aproximación, sino por una extensión apropiada de la dinámica.

Llegamos así a una nueva síntesis. Una inesperada unidad se dibuja entre las distintas descripciones temporales desarrolladas por los físicos durante sucesivas generaciones. Las descripcioens dinámicas, probabilistas y macroscópicas aparecen como disparates, si no contradictorias. Ahora podemos articularlas con mayor precisión. Uno de los resultados más satisfactorios de la teoría de las transformaciones no unitarias mediadas por $\wedge$ es precisamente que el cambio de variables que supone conduce, en los casos sencillos, como la transformación del panadero, de la ecuación de Liouville, ecuación determinista por excelencia, a una descripción probabilista propiamente dicha (cadena de Markov), incluyendo la noción de irreversibilidad. De ahí, el camino que lleva a las descripciones macroscópicas de la termodinámica fenomenológica que hemos utilizado en los capítulos IV y V es simple; basta tomar las medias sobre las ecuaciones probabilistas. Son las medias las que obedecen a las ecuaciones del tipo ecuación de Fourier o ecuaciones de cinética química.

La imagen que acabamos de describir, por seductora que sea, hoy no es más que un derroche. Aún habrán de pasar varios años para poder evaluar su trascendencia. No conocemos todavía su grado de generalidad. Pero que existan algunos tipos de sistemas dinámicos a los que se aplica, es ya un resultado que nos parece importante.

¿Qué hay de la mecánica cuántica en este punto de vista? Podemos concretar aquí un poco la idea presentada en el capítulo ante-

[8] Recordemos simplemente que $\int\varrho M\varrho dpdq=\int\varrho M\varrho dpdq=\int(\tilde{\varrho})^2 dpdq$.

rior, según la cual h introduce en la descripción dinámica una reducción del número de variables independientes.

Recordemos que en la teoría de los colectivos clásicos tenemos cuatro magnitudes fundamentales, q, p, $\partial/\partial q$ y $\partial/\partial p$ (para un sistema con un solo grado de libertad) y *dos* relaciones de no-conmutabilidad (para las parejas, q, $\partial/\partial q$ y p, $\partial/\partial p$). En la teoría clásica de trayectorias, sólo quedan las funciones q y p. Por tanto, no tenemos ninguna relación de incertidumbre. La mecánica cuántica ocupa una posición intermedia con *una sola* relación de incertidumbre, entre los operadores q_{op} y p_{op} asociados a las coordenadas y cantidades de movimiento. En suma, la mecánica cuántica es «más» determinista que la teoría clásica de los colectivos y «menos» que la teoría clásica de las trayectorias.

Podemos asociar a la constante de Planck, h, esta posición específica de la mecánica cuántica [9]. Más exactamente, un análisis comparado de los operadores clásicos y cuánticos nos permite expresar los operadores cuánticos como combinaciones de cuatro operadores clásicos fundamentales, q, p, $\partial/\partial q$ y $\partial/\partial p$. Observemos, en efecto, que h, teniendo las dimensiones de una acción $(q \cdot p)$, $h\partial/\partial p$ tiene las dimensiones de una coordenada q y $h\partial/\partial p$ las de un momento p. La magnitud h permite en este caso una reducción de cuatro magnitudes clásicas a dos, que reemplazarán las nociones de coordenadas y de cantidades de movimiento, a saber.

$$q_{op} = q - h/4\pi i\partial/\partial p$$
$$p_{op} = p + h/4\pi i\partial/\partial q$$

Una vez admitido como regla fundamental el sustituir estos nuevos operadores por los operadores q y p, volvemos naturalmente a las reglas de la mecánica cuántica.

Debemos hacer hincapié en el carácter radicalmente novedoso de las ideas dinámicas que así se presentan. Los nuevos conceptos de coordenadas y de cantidad de movimiento no pueden ya medirse simultáneamente como consecuencia de la relación de incertidumbre de Heisenberg. Ya sólo podemos preparar colectivos diversos, pero ninguno corresponde al «caso puro» de la mecánica clásica. La aparición de las derivadas $\partial/\partial q$ y $\partial/\partial p$ en las definiciones de la coorde-

[9] George, C., y Prigogine, I., «Coherence and Randomness in Quantum Theory», en *Physica*, vol. 99 A, pp. 369-382, 1979.

nada y momento cuánticos, que implica su carácter no-conmutativo, indica la existencia de una *correlación* mediada por *h* en el espacio de fases. La situación es ligeramente análoga a la que existe en una cuerda vibrante. Tampoco en ese caso podemos prescribir de modo independiente el movimiento de puntos vecinos, so pena de rasgar la cuerda.

Es por esto que, como ya hemos anunciado repetidas veces, la mecánica cuántica y la dinámica de los sistemas inestables se separan de la dinámica de trayectorias por razones opuestas. En el caso inestable, las trayectorias estaban demasiado «desordenadas», demasiado «independientes»; por el contrario, en el caso cuántico trayectorias vecinas son correlativas, no pueden ser separadas. Pero en ambos casos la noción de punto en el espacio de fases no tiene ya ningún significado. Finalmente, observemos que la «coherencia» cuántica no impide los fenómenos irreversibles. Todo lo más, implica que son necesarias condiciones más estrictas que las análogas clásicas para que, tras una inestabilidad, la descripción en funciones de onda deje de ser adecuada.

La física clásica estaba dominada por el ideal de un conocimiento máximo, completo, que reduciría el devenir a una repetición tautológica del mismo. Esto, como hemos visto, constituía el mito fundador de esta ciencia. Hoy día, la física de trayectorias es tan sólo un islote rodeado por el mar de la inestabilidad y la coherencia cuánticas. El problema del tiempo que hemos seguido a lo largo de este libro se presenta ahora totalmente nuevo. El «tiempo encontrado» es lo que definiremos en las conclusiones.

Conclusión
EL REENCANTO DEL MUNDO

1. *El fin de la omnisciencia*

La ciencia es ciertamente un arte de manipulación de la naturaleza. Pero es también un esfuerzo por comprenderla, por responder a algunas preguntas que de generación en generación los hombres no han dejado de hacerse. Una de esas preguntas vuelve como un tema obsesivo a lo largo de este libro; se apodera de la historia de las ciencias y de la filosofía. Es la cuestión de la relación entre el ser y el devenir, entre la permanencia y el cambio.

Hemos hecho alusión a las especulaciones presocráticas, resaltadas por algunas elecciones conceptuales decisivas: el cambio que da vida a las cosas y que causa su muerte, ¿viene impuesto desde el exterior a una materia que le sería indiferente? ¿O bien será el producto de la actividad intrínseca y autónoma de esta materia? ¿Hace falta evocar un motor, o es el devenir inmanente a las cosas? En el siglo XVII, la ciencia del movimiento se ha constituido *en contra* del modelo biológico de una organización espontánea y autónoma de los seres naturales. Se encuentra desde entonces divida en dos posibilidades fundamentales. Porque, si todo cambio no es más que movimiento, ¿quién es responsable del movimiento? ¿Debemos, con los

atomistas, atenernos a los átomos en el vacío, a sus colisiones aleatorias, a sus precarias asociaciones? ¿O será responsable del movimiento una «fuerza» exterior a las masas que son su soporte? De hecho, esta alternativa planteaba la cuestión de la posibilidad de prestar un orden legal a la naturaleza. ¿Será la naturaleza intrínsecamente aleatoria? ¿No son los comportamientos regulares, previsibles y reproducibles, sólo el efímero producto de una feliz casualidad? ¿O vendrá primero la ley? ¿Podemos producir «fuerzas» imponiendo a la materia inerte un comportamiento legal, susceptible de descripción matemática a través de los principios de la física?

En el siglo XVIII, el azar de los torbellinos precarios y espontáneos fue vencido por la ley matemática inmutable; y el mundo que esta ley rige no es ya el mundo atomista en donde las cosas nacen, viven y mueren, en la aleatoriedad de una proliferación sin finalidad; es un mundo en orden, un mundo en el cual nada se puede producir que no haya sido desde siempre deducible de la definición instantánea del conjunto de sus masas.

De hecho, la concepción dinámica del mundo no constituye en sí *una novedad absoluta*. Muy al contrario, podemos situar de manera muy precisa su origen: es el mundo celeste aristotélico, el mundo inmutable y divino de las trayectorias astronómicas, único susceptible, según Aristóteles, de una descripción matemática exacta. Nos hemos hecho eco de la queja según la cual la ciencia y la física en particular, desencanta al mundo. Pero lo desencanta precisamente porque lo diviniza, porque niega la diversidad y el devenir natural, de los cuales Aristóteles hacía el atributo del mundo sublunar, en nombre de una eternidad incorruptible, única susceptible de ser pensada verdaderamente. El mundo de la dinámica es un mundo «divino» sobre el cual no hace mella el tiempo, del cual están para siempre excluidos el nacimiento y la muerte de las cosas.

Sin embargo ese no será, aparentemente, el proyecto de los que llamamos los fundadores de la ciencia moderna; si querían violar la prohibición de Aristóteles según la cual las matemáticas terminan en donde empieza la naturaleza, no pensaban, parece ser, descubrir, de hecho, lo inmutable tras lo cambiante, sino extender la naturaleza cambiable y corruptible a los confines del Universo. Galileo, en la primera jornada de su *Diálogo de los grandes sistemas,* se maravilla de que algunos puedan pensar que la Tierra sería más noble y admirable si el diluvio no hubiera dejado más que un mar de hielo o si tuviera la dureza incorruptible del jaspe: ojalá que aquellos que piensen que

la Tierra sería más bella transformada en globo de cristal encuentren una cabeza de Medusa que los transforme en diamante y los haga así «mejores» de lo que son.

Pero los objetos de ciencia que seleccionaron los primeros físicos que emprendieron la matematización de los comportamientos naturales —el péndulo ideal de oscilación eterna y conservadora, la bala de cañón en el vacío, las máquinas simples de movimiento perpetuo, e igualmente las trayectorias de los planetas, que son desde ese momento asimiladas a seres naturales— todos estos objetos, a propósito de los cuales se realizó el primer diálogo experimental, se revelaron susceptibles de una *única* descripción matemática. Una descripción que reproducía precisamente la divina idealidad de los astros de Aristóteles.

Las máquinas simples de la dinámica, como los dioses de Aristóteles, no se ocupan más que de sí mismas. No tienen nada que aprender, más aún, tienen todo que perder de cualquier contacto con el mundo exterior. Simulan un ideal que el *sistema dinámico* realizará. Hemos descrito ese sistema, mostrado en qué sentido constituye en rigor un sistema del mundo, no dejando sitio alguno a una realidad que le sea exterior. En cada instante cada uno de sus puntos sabe todo aquello que tiene que saber, es decir la distribución espacial de las masas y sus velocidades. El sistema está presente en todas partes y siempre: cada estado contiene la verdad de todos los demás y todos pueden predecirse los unos de los otros, cualesquiera que sean sus respectivas posiciones sobre el eje monodromo del tiempo. Se puede decir que en ese sentido una evolución dinámica es tautológica. Sordo y ciego a cualquier mundo exterior, sea el que sea, el sistema funciona solo, y para él son equivalentes todos sus estados.

Las leyes universales de la dinámica de las trayectorias son conservativas, reversibles y deterministas. Implican que el objeto de la dinámica puede conocerse de uno a otro confín: la definición de un estado del sistema, no importa cuál y el conocimiento de la ley que rige la evolución, permiten deducir, con la certeza y la precisión de un razonamiento lógico, la totalidad tanto de su pasado como de su futuro.

Desde ese momento, la naturaleza concebida sobre el modelo del sistema dinámico no podía ser sino una naturaleza extraña al hombre que la describe. La única posibilidad abierta era acercarse al lugar de la descripción óptima, en donde el diablillo de Laplace, impasible, ha calculado desde siempre el mundo pasado y futuro, después de haber

localizado en un instante dado los valores de la posición y la velocidad de cada partícula.

Un buen número de críticos de la ciencia moderna han puesto el acento sobre el carácter de pasividad y sumisión que la física matemática presta a la naturaleza que describe. En efecto, la naturaleza autómata, totalmente previsible, es igualmente manipulable en su totalidad para quien sabe preparar sus estados. Sin embargo, pensamos, como conclusión de este libro, que el diagnóstico no puede ser tan simple. Ciertamente «conocer» ha sido en el transcurso de los tres últimos siglos muchas veces identificado con «saber manipular». Pero ésta no es toda la historia y las ciencias no se dejan introducir sin violencia al puro proyecto de maestría. Son también diálogo, no intercambio entre sujetos, sino exploraciones cuyo único propósito no es el silencio y la sumisión del otro.

Hace falta en primer lugar establecer una diferencia entre la dinámica y las otras ciencias en donde la idea de manipulación juega un papel importante. La psicología skinneriana, por ejemplo, enseña a manipular los seres vivos, que considera como cajas negras: sólo le importan las «entradas», lo que controla, y las «salidas», las reacciones del sujeto de experimentación; asimismo, la ciencia de las máquinas de vapor no tuvo como ambición el «entrar» en el hogar, sino únicamente comprender las correlaciones entre las variaciones de magnitudes medibles *desde el exterior*. En cambio, la dinámica agota el objeto mismo por un conjunto *de equivalencias que definen igual e inseparablemente posibilidades de manipulación*. El mejor ejemplo es el de la inversión de velocidades. Para identificar causa y efecto, lo que desaparece cuando se determina el cambio y la ganancia equivalente que constituye el cambio, se invoca una manipulación ideal en donde la velocidad sería invertida instantáneamente. El cuerpo volvería a su *altura* inicial perdiendo íntegramente la *velocidad* adquirida. La equivalencia fundamental $mv^2/2=mgh$, define a la vez «objetivamente» el *objeto* dinámico y define *una manipulación* idealmente posible.

La dinámica realiza así de manera singular una convergencia entre los intereses de manipulación y los intereses de conocimiento que apuntan a la sola comprensión de la naturaleza. Desde ese momento, se puede comprender que la ciencia haya podido parecer dominada por la ambición de manipular, pero también que esta denominación se haya revelado inestable, cuando nuevos objetos han atraído la atención y la curiosidad.

Desde este punto de vista no hay mejor símbolo de una transformación, que es primero la de nuestras preguntas y de nuestros intereses, que la evocación de los dos temas de admiración de Kant: el movimiento eterno de los astros, en el cielo y la ley moral, en su corazón: dos órdenes legales inmutables y heterogéneos. Hemos descubierto ahora la violencia del Universo, sabemos que las estrellas explotan y que las galaxias nacen y mueren. Sabemos que no podemos siquiera garantizar la estabilidad del movimiento planetario. Y es esta inestabilidad de las trayectorias, son las bifurcaciones en donde volvemos a encontrar las fluctuaciones de nuestra actividad cerebral, que son, hoy, nuestra fuente de inspiración [1].

Hemos procurado comprender los procesos complejos por los cuales la transformación de nuevos intereses, de las cuestiones que juzgamos decisivas, ha podido entrar en resonancia con las vías de investigación propias de la ciencia, y determinar en la coherencia cerrada de sus certidumbres la apertura que acabamos de encontrar. Y es porque se trataba de modificar el alcance de conceptos, de hacer deslizar problemas dentro de un nuevo paisaje, de introducir preguntas que trastornan la definición de las disciplinas, en una palabra, porque se trataba de inscribir en la ciencia la urgencia de nuevas preo-

[1] Las orientaciones de este libro se ligan con más o menos fortuna a las diferentes corrientes de la ola cultural estructuralista. Volvemos a encontrar sin sorpresas un cierto número de temas que nos son familiares en autores sensibles a la problemática del «yo disuelto» *(Allí donde era vinieron varios)*. Este estructuralismo estadístico o molecular (A. Moles, C. Lévi-Strauss, J. Lacan, R. Jakobson) presenta una asombrosa afinidad con la punta de lanza del gran positivismo de los años 1900 (véase, por ejemplo, G. Wunberg, *Der Frühe Hofmannstahl*, Stuttgart, W. Kohlhammer Verlag, 1965). Sobre las fuertes relaciones lógicas que unen entre sí las partes puestas en juego en los análisis de otros autores, diremos que pertenecen a un espíritu molecular, que caracteriza estos enormes objetos culturales que son los zócalos epistemológicos de Foucault y las estructuras cognoscitivas de Piaget (véase a este propósito I. Prigogine, «Génèse des structures en physico-chimie», en *Epistémologie génétique et équilibration*, Neuchâtel, Delachaux et Niestlé, 1977). El problema que se les escapa a estos últimos autores es de saber cuál es la relación entre los objetos considerados en el análisis (complejos, procesos, estructuras, etc.) y las perturbaciones, ruidos, procesos, que les son más o menos intrínsecos. El matemático dirá que es el problema de la relación entre las *estructuras algebraicas* y los *grandes números*. Estos últimos pueden verse dominados por el análisis infinitesimal o escapar a sus cálculos de una forma o de otra: en donde encontramos la subversión del principio leibniziano de la razón suficiente a través de los enunciados de R. Musil sobre el principio de la razón insuficiente: no se extrañará el lector de que lo remitamos una vez más a los trabajos de M. Serres.

cupaciones, que la apertura ha tomado las múltiples vías y a menudo retorcidas, que hemos descrito.

Quizá, la historia de la termodinámica es ejemplar a este respecto.

Le hemos dado como punto de partida la formulación de la ley de conducción del calor por Fourier. Era el primer proceso intrínsecamente irreversible para el que se encontraba una expresión matemática y por ello fue un escándalo: la unidad de la física matemática basada sobre las leyes de la dinámica explotó para siempre.

La ley de Fourier describe un proceso espontáneo —el calor se difunde—, no proporciona la forma de anularlo o de invertirlo, en una palabra, de controlarlo. Para controlar el calor es, por el contrario, necesario evitar toda conducción, hace falta *evitar* toda puesta en contacto de cuerpos a diferentes temperaturas. La ley de Fourier describe en particular un desperdicio irremediable cuando el problema es el de emplear el calor para hacer funcionar un motor. Por eso, el ciclo de Carnot, a partir del cual serán formuladas las leyes de la termodinámica, puede verse resumido a un conjunto de *astucias* para evitar la conducción irreversible. La termodinámica se ha constituido así *en relación* con la irreversibilidad, pero también *en contra* de ella, no buscando conocerla, sino economizarla. Y la entropía de Clausius describirá en primer lugar conversiones de energías caloríficas y mecánicas perfectamente controladas, íntegramente reversibles.

Sin embargo, la historia, bien se sabe, no se ha detenido aquí, y la idea de que las transformaciones no controladas, fuentes de pérdidas, contribuye siempre a aumentar irreversiblemente la entropía se ha mutado en la afirmación de un crecimiento: los procesos naturales aumentan la entropía. Aquí tenemos uno de esos deslizamientos de los que hemos hablado: el interés por los procesos naturales se impone dentro de una problemática de ingeniero.

Por primera vez se encuentra tematizado no lo manipulable, sino lo que, por definición, escapa a la manipulación o no puede ser sometido a ella, sino con astucias y con pérdidas. Así, la física reconoce que la dinámica —que describe la naturaleza como sumisa y controlable en su ser— no corresponde más que a un caso particular. En termodinámica, el carácter controlable no es natural, proviene de un artificio; la tendencia a escapar a la dominación manifiesta una actividad intrínseca de la naturaleza; todos los estados no son iguales para ella.

El siglo XIX no podía sin duda negarse a reconocer la irreversibilidad, cuando estaba a la vez obsesionado por el agotamiento de

los recursos y excitado por las perspectivas de revolución y de progreso. Y el siglo XX ha buscado a su vez en los procesos irreversibles una clave para lo que deseaba comprender de la naturaleza, esos fenómenos a los cuales debía dar un estatus físico —bajo pena de tener que renunciar a la idea de una pertinencia de la descripción física en la comprensión de la naturaleza. Si la obsesión del agotamiento, de la nivelación de las diferencias producidas, fue determinante para la interpretación del segundo principio, es el modelo biológico el que ha constituido la fuente de inspiración decisiva en lo que concierne a la historia posterior: el abandono de la restricción de la termodinámica a los sistemas artificialmente separados del mundo, su metamorfosis en una ciencia de un mundo poblado por seres capaces de evolucionar e innovar, de seres cuyo comportamiento no podemos transformar en previsible y controlable, a menos de esclavizarlos.

La termodinámica de los procesos irreversibles ha descubierto que los flujos que atraviesan ciertos sistemas físico-químicos y los alejan del equilibrio pueden alimentar fenómenos de autoorganización espontánea, rupturas de simetría, evoluciones hacia una complejidad y una diversidad crecientes. Ahí donde se paran las leyes generales de la termodinámica puede revelarse el papel constructivo de la irreversibilidad; es el dominio en donde las cosas nacen y mueren o se transforman en una historia singular, que tejen el azar de las fluctuaciones y la necesidad de las leyes.

Estamos ahora más cerca de esta naturaleza, a propósito de la cual, según los escasos ecos que han llegado hasta nosotros, se interrogaban los presocráticos y también de esta naturaleza sublunar de la que Aristóteles describía las potencias de crecimiento y de corrupción, de las que señalaba la inteligibilidad y la incertidumbre inseparables. No se puede prever con certeza los caminos de la naturaleza, la parte accidental es irreducible y mucho más decisiva que lo entendía el mismo Aristóteles; la naturaleza bifurcante es aquella en la cual pequeñas diferencias, fluctuaciones insignificantes pueden, si se producen en las oportunas circunstancias, invadir todo el sistema, engendrar un nuevo régimen de funcionamiento.

Esta inestabilidad intrínseca de la naturaleza la hemos encontrado en otro nivel, el de lo microscópico. En él, intentábamos comprender qué estatus debíamos dar a la irreversibilidad, al elemento aleatorio, a la fluctuación estadística, a todos los conceptos que la ciencia macroscópica acababa de reunir en un nuevo complejo. Porque en un mundo homogéneo descrito por las leyes habituales de la diná-

mica, o para cualquier otro sistema de leyes del mismo tipo, estos conceptos habrían sido tan sólo aproximaciones y las perspectivas que hemos introducido, ilusiones.

La idea de que la física no puede definir el movimiento molecular como determinado y, por tanto, que la descripción estadística tiene un carácter irreducible, no es, sin embargo, desconocida en física. En particular, tal como lo resalta el historiador de la ciencia Brush [2], los hombres de ciencia del siglo XIX hablan a menudo de la indeterminación, de la irregularidad, del carácter aleatorio de los movimientos moleculares, en particular para justificar ya la utilización de razonamientos estadísticos; Maxwell, por ejemplo, en el artículo «Atom», publicado en 1875 en la *Enciclopedia Británica,* escribe que la irregularidad del movimiento elemental es necesaria para que el sistema se comporte de forma irreversible. Pero, en otra parte, había afirmado que la irregularidad está ligada a nuestra ignorancia. De manera general, fue corriente la ambigüedad entre una determinación intrínseca y una indeterminación «epistemológica». Esta ambigüedad, como sabemos, se ha transformado en oposición con el problema de la interpretación del formalismo cuántico.

Sin embargo, el mismo Maxwell había entrevisto una clave para la solución que podemos aportar hoy a este problema, cuando habló de la inestabilidad del movimiento, de los puntos singulares en donde pequeñas causas producen efectos desmesurados. Pero la dinámica permite hoy definir sistemas en donde esos puntos singulares están literalmente en *todas partes,* en donde ninguna región del espacio de las fases, por muy pequeña que sea, carece de ellos.

Desde este momento, el problema puede formularse de manera general. El ideal de la omnisciencia se encarna en la ciencia de las trayectorias y en el diabillo de Laplace que las contempla durante un instante y las calcula para la eternidad. Pero las trayectorias que parecen tan reales son de hecho idealizaciones: no las observamos nunca tales como son porque para eso haría falta una observación de precisión positivamente infinita: haría falta poder atribuir a un sistema dinámico una condición inicial puntual, localizarlo en un estado único, con la exclusión de cualquier otro estado *tan cercano a él como se quiera.* En las situaciones en las cuales pensamos de costumbre, esta observación carece de consecuencias: poco importa que la tra-

---

[2] S. Brush, «Irreversibility and Indeterminism: from Fourier to Heisenberg», *Journal of the History of Ideas,* vol. 37, 1976, pp. 603-630.

yectoria no esté definida más que con aproximación; el paso al límite hacia valores muy determinados de las condiciones iniciales, si no es efectivamente realizable, es concebible y la trayectoria continúa a perfilarse como límite hacia el cual tiende una serie, de precisión creciente, de nuestras observaciones. Sin embargo, hemos encontrado dos tipos de obstáculos infranqueables a este paso al límite; son el desorden, el caos de las trayectorias para sistemas «de estabilidad débil» y la coherencia de los movimientos cuánticos que determina la constante de Planck. En los dos casos, porque, respectivamente, trayectorias divergentes se encuentran en una mezcla tan íntima como se quiera, o porque, al contrario, son demasiado solidarios, la definición de un estado puntual único pierde su sentido, la trayectoria no es solamente una idealización, sino una idealización inadecuada.

Así, la dinámica y la mecánica cuántica han descubierto los límites intrínsecos de lo que se ha llamado la «revolución científica», es decir, el carácter excepcional de las situaciones que fueron objeto del primer diálogo experimental. Los primeros físicos habian elegido juiciosamente los objetos eminentemente reducibles a una modelización matemática, objetos todos pertenecientes a la clase bastante restringida de los sistemas dinámicos para los cuales la trayectoria puede definirse con sentido. La historia de la física contemporánea está ligada al descubrimiento de la limitada validez de los conceptos puestos a punto en relación con tales sistemas, cuya descripción puede darse de forma completa y determinista, al descubrimiento, en el seno mismo de la física matemática, del mundo «sublunar».

Naturalmente, el fin del ideal de omnisciencia es el fin de un problema planteado únicamente a nivel teórico. Nunca nadie ha pretendido poder predecir las trayectorias de un sistema dinámico complejo. El mismo diabillo de Laplace aparece en la introducción de un tratado sobre teoría de la probabilidad. El diabillo de Laplace no era la figura de la maestría universal, no nos garantizaba la posibilidad de prever todas las cosas, nos anunciaba que, desde el punto de vista de la *teoría física,* el futuro está contenido en el presente, el devenir y la innovación, el mundo de los procesos en el cual vivimos y que nos constituye, son, si no ilusiones, por lo menos apariencias determinadas por nuestro modo de observación.

Tanto a nivel microscópico como a nivel macroscópico, las ciencias de la naturaleza se han liberado de una concepción estrecha de la realidad objetiva, que cree deber negar en sus principios la novedad y la diversidad en nombre de una ley universal inmutable. Se han

liberado de una fascinación que nos representaba la racionalidad como cerrada, el conocimiento como en vías de terminación. Están, desde ahora, abiertas a lo imprevisible, de lo que no demuestran más que un conocimiento. Desde ahora se han abierto al diálogo con una naturaleza que no puede ser dominada con una mirada teórica, sino solamente explorada, con un mundo abierto al cual pertenecemos, en la construcción del cual participamos. Serge Moscovici ha sabido describir bien esta apertura bautizándola como «revolución kepleriana», por oposición a las revoluciones copernicanas que mantienen la idea de un punto de vista absoluto. Hemos citado, al principio de este libro, textos que acusaban a la ciencia, la asimilaban a la obra de desencanto del mundo. Citaremos ahora a Moscovici cuando describe esas ciencias que se inventan hoy día:

«Las ciencias, arrastradas en esta aventura, la nuestra, lo son para refrescar todo lo que tocan y calentar todo lo que penetran, la tierra sobre la cual vivimos y las verdades que nos hacen vivir. A cada vuelta de esquina se oye, no el eco de un fin, no el redoblar de las campanas por una desaparición, sino la voz de un renacimiento y de un principio, sentado en nuevas bases, de la humanidad y de la materialidad fijadas un instante en su efímera permanencia. Es por lo que los grandes descubrimientos no son, como el caso de Copérnico, sustraídos a un lecho de muerte, sino ofrecidos, como en el caso de Kepler, en el camino de los sueños despiertos y de las pasiones bien vivas [3].»

Nos queda ahora pasar revista a algunas de las consecuencias de la metamorfosis de la ciencia, de la cual acabamos de bosquejar la historia.

2. *El tiempo reencontrado*

Después de tres siglos, la física ha vuelto a encontrar el tema de la multiplicidad de los tiempos. Se atribuye muchas veces a Einstein el atrevimiento de haber relacionado el tiempo con una cuarta dimensión. Sin embargo, Lagrange, y también d'Alembert en la *Enciclopedia*, habían adelantado ya que la duración y las tres dimensiones espaciales forman un conjunto de cuatro dimensiones. De hecho, afirmar que el tiempo no es sino el parámetro geométrico que permite

[3] S. Moscovici, «Quelle unité de l'homme?» (citado aquí, p. 42), pp. 297-298.

contar desde el exterior y, como tal, agota la verdad del devenir de todo ser natural, es casi una constante de la tradición física desde hace tres siglos. Así, Emile Meyerson ha podido describir la historia de las ciencias modernas como la realización progresiva de lo que veía como un prejuicio constitutivo de la razón humana: la necesidad de una explicación que relaciona lo diverso y lo cambiante con lo idéntico y lo permanente y que desde ese momento *elimina el tiempo*.

En nuestra época, es Einstein el que encarna con más fuerza la ambición de eliminar el tiempo y eso, a través de todas las críticas, de todas las protestas, de todas las angustias que levantaron sus afirmaciones absolutas. Hay una escena muy conocida, que es la que ocurrió en la Sociedad de Filosofía de París, el 6 de abril de 1922 [4]. Henri Bergson intentó defender, en contra de Einstein, la multiplicidad de los tiempos vividos, coexistentes en la unidad de un tiempo real, defender la evidencia intuitiva que nos hace pensar que esas duraciones múltiples participan de un mismo mundo. Leamos la contestación de Einstein: rechaza sin apelación, por incompetencia, el «tiempo de los filósofos», seguro de que en ninguna experiencia vivida puede salvar lo que niega la ciencia.

Más notable todavía es quizá el intercambio de cartas entre Einstein y el más íntimo de sus amigos, el de su juventud de Zurich, Michele Besso [5]. Besso era un científico, pero al final de su vida se mostró preocupado cada vez con más intensidad por la filosofía, la literatura, todo aquello que teje el significado de la existencia humana. No cesó desde entonces de preguntar a Einstein: «¿Qué es la irreversibilidad? ¿Cuál es su relación con las leyes de la física?» Y Einstein le contestó, con una paciencia que no tuvo nada más que para este amigo: la irreversibilidad no es más que una ilusión suscitada por condiciones iniciales improbables. Este diálogo sin fin se repitió hasta que en una última carta, a la muerte de Besso, Einstein escribió: «Michele me ha precedido de poco para irse de este mundo extraño. Eso no tiene importancia. Para nosotros, físicos convencidos, la diferencia entre pasado, presente y futuro no es más que una ilusión, aunque sea tenaz.»

La física de hoy no niega el tiempo. Reconoce el tiempo irrever-

---

[4] Texto recogido por H. Bergson, *Mélanges*, París, P.U.F., 1972, pp. 1340-1346.

[5] *Correspondance Albert Einstein-Michele Besso, 1903-1955*, París, Hermann, 1972.

sible de las evoluciones hacia el equilibrio, el tiempo rítmico de las estructuras cuyo pulso se nutre del mundo que las atraviesa, el tiempo bifurcante de las evoluciones por inestabilidad y amplificación de fluctuaciones y hasta ese tiempo microscópico que hemos introducido en el último capítulo y que manifiesta la indeterminación de las evoluciones físicas y microscópicas. Cada ser complejo está constituido de una pluralidad de tiempos, conectados los unos con los otros según articulaciones sutiles y múltiples. La historia, sea la de un ser vivo o la de una sociedad, no podrá jamás ser reducida a la sencillez monótona de un tiempo único, que ese tiempo introduzca una invariancia o que trace los caminos de un progreso o de una degradación. La oposición entre Carnot y Darwin ha sido reemplazada por una complementariedad que nos queda por comprender en cada una de sus producciones singulares.

El descubrimiento de la multiplicidad de los tiempos no es una «revelación» surgida de repente en la ciencia; muy al contrario, los hombres de ciencia han dejado hoy de negar lo que, por así decirlo, *cada uno sabía.* Es por eso por lo que la historia de la ciencia que negó el tiempo fue también una historia de tensiones sociales y culturales.

Lo que originalmente había sido una apuesta arriesgada contra la tradición aristotélica dominante se transformó primero, progresivamente, en una afirmación dogmática dirigida contra todos los —químicos, biólogos, médicos, por ejemplo— que intentaban hacer respetar la diversidad cualitativa de la naturaleza. Pero a finales del siglo XIX, la confrontación ya no se encontraba ahí; no se situaba tanto entre los científicos, organizados ya en disciplinas académicas diferenciadas, como entre «la ciencia» y el resto de la cultura y, en particular, la filosofía. Es posible ver en ciertas oposiciones casi jerárquicas establecidas en el interior de doctrinas filosóficas de esta época un testimonio de la confrontación con el dogmatismo del discurso científico. Así, el «tiempo vivido» de los fenomenólogos, o la oposición entre el mundo objetivo de la ciencia y el *Lebenswelt* que debe escaparse de él, podrían atribuir algunas de sus características a la necesidad de definir un último bastión contra los estragos de la ciencia. Hemos descrito las pretensiones de la ciencia como ligadas a uno de sus estados históricamente e intelectualmente circunscrito, pero para algunos se trataba de apuestas absolutas, en las cuales se trataba de la vocación o del destino del hombre, de ataques en donde se jugaba la salvación o la pérdida del hombre. Así, ¿no recuerda Gerard Gra-

nel que, según Husserl, la filosofía, la meditación del enraizamiento originario de toda experiencia está en lucha contra un olvido que expondría la humanidad moderna a habitar, con todas sus ciencias y sus eficiencias, en el monumento en ruina de la filosofía —que para Husserl ha *hecho* el mundo europeo y su ciencia— como las bandas de monos en el templo de Angkor? [6].

Hay todo un conjunto de oposiciones, aquella entre apariencia y realidad —con la cuestión de quién, ciencia o filosofía, será el juez—, aquella entre saber y no saber, aquella entre prejuicios ciegos y saber producido por una ruptura o por un ascetismo, aquella entre ciencia de los fundamentos y ciencia del epifenómeno, que estructuran el terreno de un enfrentamiento en relación al cual quisiéramos hoy alejarnos lo más posible. De cualquier manera, los físicos han perdido todo argumento *teórico* para reivindicar cualquier privilegio de extraterritorialidad o de precedencia. Como científicos, pertenecen a la cultura a la cual contribuyen a su vez.

3. *Actores y espectadores*

Aquí también es quizá la historia de Einstein la que da a comprender de forma más dramática el sentido de la transformación sufrida por la física en el transcurso de este siglo. Es Einstein, en efecto, el primero que descubrió la fecundidad de las *demostraciones de imposibilidad*, cuando hizo de la imposibilidad de transmitir una información a una velocidad superior a la de la luz la base de la exclusión de la noción de simultaneidad absoluta a distancia y construyó sobre la exclusión de este «inobservable» la teoría de la relatividad. El mismo Einstein veía en este paso el equivalente del paso que fundó la termodinámica sobre la imposibilidad de un movimiento perpetuo. Pero alguno de sus contemporáneos, como Heisenberg, vieron bien el alcance de la diferencia entre las dos imposibilidades; en el caso termodinámico, se define una cierta *situación* como ausente

---

[6] Artículo «Husserl» en *Encyclopedia Universalis*, París, 1971, recogido con «La crise de l'humanité européenne et la philosophie» de Husserl por las reediciones Paulet, París, 1975. Este pequeño fascículo atestigua el hecho de que la idea de «misión humana de Occidente» no es la exclusiva de los científicos.

de la naturaleza; en el caso de la relatividad, es una *observación* la que se define como imposible, es decir, un tipo de observación entre la naturaleza y el que la describe. Y es siguiendo, a pesar de Einstein, el ejemplo de Einstein como Heisenberg fundó el formalismo cuántico sobre la exclusión de las magnitudes definidas por la física como inobservables.

Merleau-Ponty había afirmado, en sus «Resúmenes de clase» [7], que los descubrimientos «filosóficos» de la ciencia, sus transformaciones conceptuales fundamentales, provienen muchas veces de *descubrimientos negativos*, ocasión y punto de partida de una inversión de perspectiva. Las demostraciones de imposibilidad que, sea en relatividad, en mecánica cuántica o en dinámica, nos han enseñado que no se podía describir la naturaleza «desde el exterior», como mero expectador. La descripción es una comunicación y esta comunicación está sometida a ligaduras muy generales que la física puede aprender a reconocer porque esas ligaduras nos identifican como seres macroscópicos situados en el mundo físico. Las teorías físicas presuponen de ahora en adelante la definición de las posibilidades de comunicación con la naturaleza, el descubrimiento de las preguntas que no puede oír —a menos que seamos nosotros quienes no podamos oír sus respuestas a este respecto.

La naturaleza misma de los argumentos teóricos por los cuales aclaramos la nueva postura de las descripciones físicas manifiesta el doble papel de actor y de espectador, que se nos asigna en adelante. Así, incluso en la teoría dinámica de los sistemas de estabilidad débil, o en mecánica cuántica, continuamos refiriéndonos a las nociones de punto en el espacio de las fases y de trayectorias que nos definen como espectadores, pero es para inmediatamente precisar lo que hay en los dos casos de idealización inadecuada. Llegamos aquí hasta ciertos temas asociados al «idealismo», pero es muy notable que las exigencias más determinantes en la adopción de la nueva postura conceptual que acabamos de definir sean aquéllas usualmente asociadas con el «materialismo»: comprender la naturaleza de tal manera que no sea absurdo afirmar que nos ha producido.

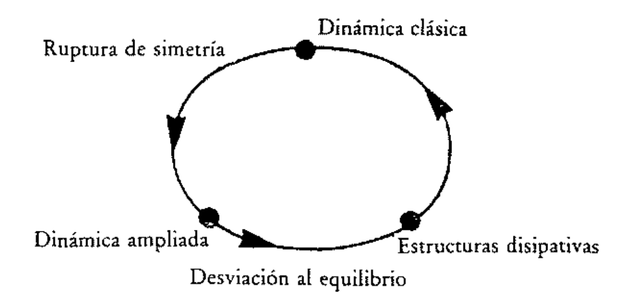
Es posible situar nuestro doble papel de actor y de espectador en un contexto que aclara la situación del conocimiento teórico tal como la evolución de la física nos permite hoy concebirla. Quisiéramos po-

[7] M. Merleau-Ponty, *Résumés de Cours 1952-1960*, París, Gallimard, 1968, p. 119.

ner al día la articulación coherente, hoy posible, de lo que la ciencia clásica oponía; a saber: el observador desencarnado y el objeto descrito desde una posición de sobrevuelo. Naturalmente, sobrepasar esta oposición, mostrar que en adelante los conceptos físicos contienen una referencia al observador, no significa en absoluto que este observador deba de estar caracterizado desde un punto de vista «biológico», «psicológico» o «filosófico». La física se limita a atribuirle el tipo de propiedad que constituye la condición necesaria a toda relación experimental con la naturaleza, la distinción entre el pasado y el futuro, pero la exigencia de coherencia lleva a buscar si la física puede igualmente encontrar este tipo de propiedad en el mundo macroscópico.

Partamos, por ejemplo, de este observador. Como acabamos de decir, lo único que se le pide es una actividad orientada en el tiempo, sin la cual ninguna explicación de la que nos rodea y, *a fortiori*, ninguna descripción física que sea reversible o irreversible, será concebible sin una actividad orientada en el tiempo. La definición misma de aparato de medida, o la preparación de un experimento, necesita la distinción entre «antes» y «después» y es porque conocemos la irreversibilidad del devenir, por lo que podemos conocer el movimiento reversible, el simple cambio reducible a una equivalencia reversible entre causa y efecto. Pero la dinámica clásica constituye a su vez un punto de partida. El mundo legal de las trayectorias reversibles permanece así en el corazón de nuestra física; constituye una referencia conceptual y técnica necesaria para definir y describir el dominio en donde la inestabilidad permite introducir la irreversibilidad, es decir, una ruptura de simetría de las ecuaciones en relación al tiempo. Sin embargo, el mundo reversible no es entonces más que un caso particular y la dinámica, equipada con el operador entropía que permite describir el mundo complejo de los procesos, se encuentra a su vez tomada como punto de partida: puede, a nivel macroscópico, engendrar la monótona inercia de los estados de equilibrio —estados medios producidos por compensación estadística—, pero puede también engendrar la singularidad de las estructuras disipativas nacidas de una desviación del equilibrio y, finalmente, la historia, el camino evolutivo singular que subraya una sucesión de bifurcaciones. A propósito de una estructura formada como consecuencia de tal evolución, se puede afirmar que su actividad es el producto de su historia y contiene así la distinción entre pasado y futuro. Queda así cerrado el bucle, el mundo macroscópico es a su vez capaz de darnos el punto de

partida que necesitábamos para toda observación. Resumamos este esquema circular:



A la reversibilidad totalmente ideal de la dinámica clásica se oponen dos estilos de devenir en los que permite pensar la irreversibilidad a la cual la dinámica ampliada da sentido. El uno, suspendido en el pasado, corre hacia la forma más probable del equilibrio; el otro está abierto a un porvenir más propiamente histórico, es el de las estructuras disipativas que constituyen el azar de las singularidades aleatorias. Pero ninguna necesidad lógica imponía que, en la naturaleza, existiesen efectivamente estructuras disipativas; ha hecho falta el «hecho cosmológico» de un universo capaz de mantener ciertos sistemas lejos del equilibrio para que el mundo macroscópico sea un mundo poblado de «observadores», es decir, una *naturaleza.* Este esquema no traduce así una verdad de orden lógico o epistemológico, sino la verdad de nuestra situación de seres macroscópicos en un mundo mantenido lejos del equilibrio. Traduce también la verdad histórica de *nuestra* física, que se ha constituido en conexión con la descripción de comportamientos reversibles y deterministas, y les atribuye hoy no el papel de realidad fundamental, sino el de marco de referencia. Nos parece esencial que este esquema no suponga ningún modo o momento fundamental: cada uno de los tres modos está embarcado en la cadena de las implicaciones, lo que traduce el nuevo tipo de coherencia interna a la cual puede pretender la física contemporánea.

El esquema que acabamos de describir articula descripciones cada una de las cuales había aspirado antiguamente a la preeminencia. De forma más general, cuando se trata de las descripcioens de los siste-

mas complejos, vivos y sociales en los cuales nos interesamos hoy, está claro que una descripción «desde lo alto» está totalmente excluida y que todo modelo teórico presupone la elección de la pregunta.

Tenemos aquí una lección de sabiduría que es importante subrayar. Hoy, en efecto, las ciencias que se dicen «exactas» tienen por misión salir de los laboratorios en donde han aprendido poco a poco la necesidad de resistir a la fascinación de una búsqueda de la verdad general de la naturaleza. Las situaciones idealizadas, lo saben desde ahora, no les dará ninguna clave universal, deben volver a ser al fin «ciencias de la naturaleza», confrontadas a la riqueza múltiple que se han tomado la libertad de olvidar durante mucho tiempo. Desde ese momento se planteará para ellas el problema a propósito del cual algunos han querido sentar la singularidad de las ciencias humanas —sea para elevarlas o rebajarlas—, el diálogo necesario con conocimientos preexistentes con motivo de situaciones familiares a cada uno. Al igual que las ciencias de la sociedad, las ciencias de la naturaleza no podían, entonces, olvidar el arraigo social e histórico que supone la familiaridad necesaria a la realización de un modelo teórico de una situación concreta. Importa pues, más que nunca, no hacer de este arraigo un obstáculo, de no concluir, de la relatividad de nuestros conocimientos en cualquier relativismo desencantado. En su reflexión sobre la situación de la sociología, Merleau-Ponty había subrayado ya esta urgencia, la urgencia de pensar lo que él llamaba una «verdad en la situación»:

«Mientras guardo en mi posesión el ideal de un espectador absoluto, de un conocimiento sin punto de vista, no puedo ver en mi situación más que un principio de error. Pero sí he reconocido una vez que a través de él estoy transplantado sobre toda acción y todo conocimiento que pueda tener un sentido para mí y que contiene, en todas partes, todo lo que puede *ser* para mí, entonces mi contacto con lo social en lo finito de mi situación se me revela como el punto de origen de toda verdad, comprendida la ciencia y, ya que tenemos una idea de la verdad, ya que estamos en la verdad y no podemos salir de ella, no me queda más remedio que definir una verdad dentro de la situación» [8].

Así, la ciencia se afirma hoy como ciencia *humana*, ciencia hecha

[8] M. Merleau-Ponty, «Le philosophe et la sociologie», en *Eloge de la philosophie*, colección Idées, París, Gallimard, 1960, pp. 136-137.

por hombres para hombres. En el seno de una población rica y diversa de prácticas cognoscitivas, nuestra ciencia ocupa la posición singular de escucha poética de la naturaleza —en el sentido etimológico en el cual el poeta es un fabricante—, exploración activa, manipuladora y calculadora pero ya capaz de respetar a la naturaleza que hace hablar. Es probable que esta singularidad continuará suscitando la hostilidad de aquellos para quienes todo cálculo y toda manipulación son sospechosos, pero no la que debían suscitar con mucha legitimidad ciertos juicios sumarios de la ciencia clásica.

4. *Un torbellino dentro de la naturaleza turbulenta*

Nos hemos mantenido hasta aquí dentro de una problemática propiamente científica. Sin embargo, no hay ninguna razón para limitarnos a ella; desde siempre, la filosofía ha buscado en todas partes en donde podía encontrar el camino de respuestas a sus preguntas y, por su parte, la física teórica puede ya comprender el sentido de ciertas cuestiones filosóficas que tienen relación con la situación del hombre en el mundo. Podemos, por ejemplo, comentar la transformación dinámica desde el modelo de los sistemas estables cuyas trayectorias podían ser calculadas, hasta el descubrimiento de la estabilidad débil, por una doble referencia filosófica: las mónadas leibnizianas y el clinamen lucreciano, dos construcciones filosóficas entre las que han sido criticadas como más aventuradas [9]. El clinamen, que turba «sin razón» las trayectorias de los átomos de Lucrecio, ha sido considerado a menudo como absurdo e inconsecuente; las mónadas de Leibniz, unidades metafísicas sin comunicación entre ellas, «sin ventanas por las cuales alguna cosa pueda entrar o salir de ella», han sido calificadas de «delirio lógico».

Ahora bien, hemos visto que una propiedad de todo sistema cuyas trayectorias son exactamente calculables es que puede dársele «una representación privilegiada»: en términos de entidades sin interacción, de tal manera que cada una despliega por su propia cuenta, como si estuviera sola en el mundo, un movimiento pseudoinercial. Cada una traduce entonces, a lo largo de su movimiento, su propio

[9] Para todo lo que sigue, véase también I. Prigogine, i. Stengers y S. Pahaut, «La dynamique, de Leibniz à Lucréce», en *Critique*, vol. 35, enero 1979, pp. 35-55.

estado inicial, pero también coexisten con todas las demás en una armonía preestablecida. En esta representación, cada estado de cada entidad, estando siempre perfectamente autodeterminado, refleja en cada instante el estado de todo el sistema en sus menores detalles. Esta es una definición de la mónada leibniziana. Vayamos más lejos: una forma rápida de describir los estados estacionarios que constituyen las órbitas electrónicas del átomo de Bohr, es decir, que constituyen otras tantas mónadas.

Podemos ya traducir la propiedad física descubierta por la dinámica hamiltoniana bajo esta forma: todo sistema integral, en el sentido definido en el capítulo II, sección 3, admite una representación monádica. Y a la inversa, la monadología leibniziana puede traducirse en lenguaje dinámico: *el Universo es un sistema integrable.*

¿Debemos hablar de coincidencia? La equivalencia matemática entre la *representación newtoniana,* que acude a las masas y a las fuerzas, y la *representación monádica,* en donde cada unidad despliega en su evolución espontánea la ley interna de su comportamiento, ¿no es en el fondo la traducción, bajo forma de propiedad fisicomatemática, del hecho de que las dos descansan sobre la misma elección filosófica: la preeminencia acordada al ser sobre el devenir, a la permanencia sobre el cambio? Leibniz, padre de la dinámica, no ignoraba sin duda lo que Whitehead ha subrayado [10]: las fuerzas newtonianas no establecen más que relaciones puramente exteriores entre las masas, que no son más que su soporte indiferente; son incapaces de causar un devenir que no sea eterna y monótona repetición de una verdad invariante.

Pero los procesos de absorción y de emisión de fotones, fuente de los datos experimentales que estuvieron en la base de la mecánica cuántica, bastan por sí mismos para establecer que allí no está toda la historia: constituyen, entre las órbitas electrónicas «monádicas», una interacción que ninguna transformación formal puede eliminar.

La física de los procesos nos conduce a introducir una tercera representación, irreducible a las representaciones leibnizianas y newtonianas, que no describen el cambio ni en términos de unidades bien definidas pero autónomas y sin interacción, ni en términos de unidades mal definidas (ya que hay energía potencial «entre» ellas) y de sus interacciones. La tercera representación describe unidades reales

[10] Enviamos al lector a I. Leclerc, *Whitehead's Metaphysics,* Bloomington, Indiana University Press, 1975.

(fotones, electrones) que, por definición, participan en procesos disipativos no eliminables por transformación. Estas unidades, contrariamente a los simples «soportes de fuerzas» newtonianos, suponen la interacción irreversible por el mundo, su misma existencia física está definida por el devenir en el cual participan [11].

Sin ir más lejos en esas nuevas perspectivas proponemos, a fin de reconocer la convergencia entre teoría física y doctrina filosófica a propósito de la articulación entre ser y devenir, llamar a esta tercera representación la representación «whiteheadiana». Whitehead ha escrito:

«La elucidación del sentido de la frase "todas las cosas fluyen" es una de las mayores tareas de la metafísica» [12]. Física y metafísica se encuentran hoy para pensar un mundo en donde el proceso, el devenir, sería constitutivo de la existencia física y en donde, contrariamente a las mónadas leibnizianas, las entidades existentes podrían interaccionar y, así, nacer y morir.

Otra interrogación filosófica que podemos releer es la del materialismo dialéctico y de su búsqueda de las leyes universales a las cuales respondería el devenir dialéctico de la naturaleza. Al igual que para los materialistas que querían concebir una naturaleza capaz de historia, las leyes de la mecánica han sido un obstáculo para nosotros, pero no las hemos declarado falsas en nombre de otro tipo de leyes universales. Bien al contrario, ya que hemos descubierto los límites de su campo de aplicación, les hemos conservado su carácter fundamental; constituyen la referencia técnica y conceptual que nos es necesaria para describir y definir el dominio en donde ya no son suficientes para determinar el movimiento.

Este papel de la referencia a un mundo legal y en orden y, más técnicamente, a la teoría monádica de las evoluciones paralelas, es precisamente el papel que juega la caída, también paralela, legal y eterna, de los átomos lucrecianos en el vacío infinito. Hemos hablado ya del clinamen y de la inestabilidad de los flujos laminares. Aquí se presenta la posibilidad de una interpretación menos ligada a tal o cual fenómeno físico particular. Como Serres lo ha demostrado [13], la caída infinita constituye un *modelo* para pensar la génesis natural, el de-

[11] Se desarrollan estas perspectivas en I. Prigogine, *From Being to Becoming* (trad. Ed. Masson, citado *supra*, p. 278.

[12] A. D. Whitehead, *Process and Reality*, pp. 240-241.

[13] M. Serres, *La naissance de la Physique dans le texte de Lucrèce*, p. 139.

sorden que da vida a las cosas. Sin el clinamen, que viene a perturbar la caída vertical y permite encuentros, léase asociaciones entre átomos hasta ahora aislados, cada uno en su caída monótona, ninguna naturaleza podría ser creada, porque solamente se perpetuarían los encadenamientos entre causa y efecto equivalentes, bajo el imperio de las leyes de la fatalidad *(foedera fati): Denique si semper motus connectitur omnis et uetere exoritur (semper) nuus ordine certo nec declinando faciunt primordia motus principium quoddam quod fati foedera rumpat, ex infinito ne causam causa sequitur, libera per terras unde haec animantibus existat...?* [14].

Lucrecio, podríamos decir, ha *inventado* el clinamen, en el mismo sentido en que inventamos reliquias o tesoros arqueológicos: se «sabe» que están allí antes de cavar y de descubrirlos efectivamente. Y de la misma manera, la física contemporánea ha inventado el tiempo irreversible. Porque si sólo existían las trayectorias monótonas irreversibles, ¿de dónde vendrían los procesos irreversibles que nos crean y de los cuales vivimos? «Sabíamos» que el tiempo es irreversible y por eso el descubrimiento de la estabilidad débil de las trayectorias de ciertos sistemas fue fuente de innovación, una ocasión extraída de una ampliación de la dinámica.

Allí donde las trayectorias dejan de estar determinadas, allí donde se rompen los *foedera fati* que rigen el mundo monótono y en orden de las evoluciones deterministas, empieza la naturaleza. Allí empieza también una ciencia nueva que describe el nacimiento, la proliferación y la muerte de los seres naturales. «A la física de la caída, de la repetición, del encadenamiento riguroso, sustituye la ciencia creativa del azar y de las circunstancias» [15]. A los *foedera fati* sustituyen los *foedera naturae*, sobre los cuales Serres observa que designan tanto «leyes» de la naturaleza, relaciones locales, singulares, históricas entre las cosas como una «alianza», un contrato con la naturaleza.

Volvemos así a encontrar a propósito de la física lucreciana la relación que hemos descubierto en el saber moderno, entre las eleccio-

[14] Lucrecio, *De la Naturaleza:* «Vamos a ver, si los movimientos son solidarios, si siempre un nuevo movimiento nace de uno más antiguo siguiendo un orden inflexible, si por su declinación los átomos no tomarán la iniciativa de un movimiento que rompe las leyes del destino, ¿de dónde viene esta libertad concedida a todo lo que respira sobre la tierra...?»

[15] M. Serres, *op. cit.*, p. 136.

nes decisivas en el fundamento de una descripción física y una concepción filosófica, ética o religiosa referente a la situación del hombre en la naturaleza. La física de los encadenamientos universales se opone a otra ciencia que ya no lucha contra el desorden o la indeterminación en nombre de la ley y del dominio. La ciencia clásica de los flujos, de Arquímedes a Clausius, se opone a la ciencia de las turbulencias, de las evoluciones bifurcantes, a la ciencia que enseña que, lejos de los canales, el desorden puede dar vida a las cosas y a la naturaelza y a los hombres. «La sabiduría helénica alcanza aquí uno de sus puntos álgidos. En donde está el hombre en el mundo, es del mundo, está en la materia, es de la materia. No es un extraño, sino un amigo, un familiar, un comensal y un igual. Mantiene con las cosas un contrato venéreo. Muchas otras sabidurías y muchas otras ciencias están basadas a la inversa sobre la ruptura del contrato. El hombre es un extraño al mundo, al alba, al cielo, a las cosas. Las odia, lucha contra ellas. Su entorno es un enemigo peligroso a combatir, a mantener en el servilismo... Epicuro y Lucrecio viven un universo reconciliado. En donde la ciencia de las cosas y la ciencia del hombre se entienden en la identidad. Soy el desorden, un torbellino en la naturaleza turbulenta» [16].

5. *Una ciencia abierta*

Podemos igualmente dedicarnos a otro tipo de lectura, centrada esta vez alrededor del modo de desarrollo propio a la ciencia. Hemos descrito esta dinámica interna de la ciencia en términos de panoramas bastante amplios, de preguntas planteadas sin cesar y replanteadas, de cambios a ritmo lento. Hubo poco de real irreversibilidad en la historia que hemos contado, pocas preguntas definitivamemente abandonadas, caducadas. Se compara muchas veces la evolución de la ciencia a la evolución de las especies en su descripción más clásica: arborescencias cada vez más diversas y especializadas, progreso irreversible y unidireccional. Nos gustaría proponer pasar de la imagen biológica a la imagen geológica, porque lo que hemos descrito es más bien del orden del deslizamiento que de la mutación. Preguntas abandonadas o negadas por una disciplina han pasado en silencio a otra, han resurgido dentro de un nuevo contexto teórico. Su recorrido,

[16] M. Serres, *op. cit.*, p. 162.

subterráneo y de superficie, nos parece manifestar el sordo trabajo de algunas cuestiones que determinaron la profunda puesta en comunicación más allá de la proliferación de las disciplinas. Y es muchas veces en las intersecciones entre disciplinas, con ocasión de la convergencia entre vías separadas de aproximación, donde han resurgido problemas que creíamos saldados, que han podido insistir, bajo una forma renovada, antiguas preguntas, anteriores al enclaustramiento disciplinario.

Es característico, bajo este punto de vista, que muchas sorpresas conceptuales que la evolución de las ciencias produce puedan verse atribuir la apariencia fatal de venganzas a largo plazo. El descubrimiento de los espectros de emisión y absorción que arrastró la introducción de la noción de operador cuántico y así el más decisivo alejamiento con relación a la ciencia clásica de las masas y de las trayectorias, es de alguna manera la venganza de los antiguos químicos, que no consiguieron, en su tiempo, hacer valer la especificidad de la materia química contra la generalidad de la masa. En la intersección de la dinámica y de la ciencia de los elementos químicos ha resurgido, y no ha podido ser reprimida, la pregunta que plantearon. ¿Y no queda también vengado Stahl, ya que en la intersección fecunda entre fisicoquímica y biología, de donde ha nacido la biología molecular, hemos oído afirmar que el único proceso biológico que la física puede deducir de sus leyes es la descomposición y la muerte? Hemos hablado ya de la revancha de los vencidos por la ciencia newtoniana: el fatal anuncio, en pleno triunfo de esta ciencia, de la ley matemática de la propagación del calor, que hará para siempre de la fisicoquímica una ciencia irreducible a la dinámica clásica, una ciencia de los procesos.

La historia de las ciencias no tiene la sencillez atribuida a la evolución biológica hacia la especialización, es una historia más sutil, más retorcida, más sorprendente. Es siempre susceptible de volver atrás, de volver a encontrar, en el seno de un paisaje intelectual transformado, preguntas olvidadas, de demoler los tabiques que ha constituido y, sobre todo, de estar por encima de los prejuicios más enraizados, incluso de aquellos que parecen serle constitutivos.

Tal descripción se encuentra en claro contraste con el análisis psicosocial por el cual Thomas Kuhn ha rejuvenecido recientemente ciertos elementos esenciales de la concepción positivista de la evolución de las ciencias: evolución hacia una especialización y una separación creciente de las disciplinas científicas, identificación del com-

portamiento científico «normal» con el trabajador «serio», «silencioso», que no se detiene en cuestiones «generales» sobre el significado global de sus investigaciones y se ciñe a los problemas específicos de su disciplina, autonomía esencial del desarrollo científico en relación con los problemas culturales, económicos y sociales [17].

No nos compete poner en duda lo bien fundado de esta descripción de la actividad científica. De todas maneras, nos basta subrayar aquí su carácter parcial e históricamente situado. *Históricamente situado* quiere decir que la actividad científica corresponde tanto mejor a la descripción de Kuhn que se realiza en el contexto de las universidades modernas, en donde investigación e iniciación de los futuros investigadores están sistemáticamente asociadas, es decir, en el seno de una estructura académica de la cual puede seguirse la aparición a lo largo del siglo XIX, pero que era inexistente anteriormente. Es, en efecto, en esta estructura en la que se encuentra la clave del saber implícito, del «paradigma» del cual Kuhn hace la base de la investigación normal llevada a cabo por una comunidad científica. Es rehaciendo en forma de ejercicio los problemas claves resueltos por las generaciones precedentes cómo los estudiantes aprenden las teorías que fundamentan la investigación en el seno de una comunidad y también los criterios que definen un problema como interesante y una solución como aceptable. La transición de estudiante a investigador se hace, en este tipo de enseñanza, sin discontinuidad: el investigador sigue resolviendo problemas que identifican como esencialmente parecidos a los problemas modelo, aplicándoles técnicas similares; simplemente se trata de problemas que nadie antes que él había resuelto. *Parcial* quiere decir que, aún en nuestra época, para la cual la descripción de Kuhn tiene el más alto grado de pertinencia, no concierne, a lo sumo, más que a una dimensión de la actividad científica, más o menos importante, según los investigadores individuales y el contexto institucional en donde trabajan.

Es a propósito de la transformación del paradigma, tal como lo concibe Kuhn, como podremos precisar mejor esta observación. Esta transformación revestirá a menudo las formas de una *crisis:* el paradigma, en lugar de ser una norma silenciosa, casi invisible, en lugar de estar «por encima de toda duda», es discutido y cuestionado. Los

---

[17] T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions, 2.ª edición, Chicago, The University Press,* 1970.

miembros de la comunidad, en vez de trabajar con unanimidad en resolver problemas reconocidos por todos, plantean cuestiones «fundamentales», cuestionan la legitimidad de sus métodos. El grupo, que su educación había hecho homogéneo en lo que se refiere al trabajo de investigación, se diversifica, las diferencias de puntos de vista, de experiencias culturales, de convicciones filosóficas, toman luz y juegan a menudo un papel decisivo en el descubrimiento del nuevo paradigma. La aparición de este último acrecienta aún más la intensidad de las discusiones. Los respectivos dominios de fecundidad de los paradigmas rivales se ven puestos a prueba hasta que una diferencia, amplificada y estabilizada por los circuitos académicos, decide la victoria de uno de ellos. Poco a poco, con la nueva generación de científicos, se reinstalan el silencio y la unanimidad, se escriben nuevos manuales y se considera una vez más que todo es evidente.

Bajo esta óptica, el motor de la innovación científica es precisamente el comportamiento intensamente conservador de las comunidades científicas, que aplican con obstinación a la naturaleza las mismas técnicas, los mismos conceptos y terminan siempre por encontrar de su parte una resistencia tan pertinaz: la naturaleza se niega a expresarse en el lenguaje que imponen las reglas paradigmáticas y la crisis que acabamos de describir estalla con más fuerza, ya que la confianza era ciega. A partir de aquí, todos los recursos intelectuales se consagran a la búsqueda del nuevo lenguaje alrededor de un conjunto de problemas considerados desde ese momento como decisivos; a saber: los que han suscitado la resistencia de la naturaleza. Las comunidades científicas provocan crisis de forma sistemática, pero es en cierta manera de forma involuntaria.

La pregunta que hemos escogido para hacer a la historia de las ciencias nos ha conducido a explorar dimensiones muy diferentes de las que interesan a Kuhn. Sobre todo nos han retenido las continuidades, no las continuidades «evidentes», sino aquellas, más escondidas, de las cuestiones a propósito de las cuales no han cesado de interrogarse ciertos científicos. Nos parece que no hace falta intentar comprender por qué se ha continuado, de generación en generación, discutiendo de la especificidad de los comportamientos complejos, de la irreducibilidad de la ciencia del fuego y de las transformaciones de la materia a la descripción de las masas y de las trayectorias; más bien nos parece que la cuestión es saber cómo tales problemas, problemas de los Stahl, Diderot, Venel, han podido ser olvidados.

La historia de la física, desde hace un siglo, nos muestra cierta-

mente algunas crisis que se parecen a las descripciones de Kuhn, crisis que padecen los científicos sin haberlas buscado, crisis a las cuales preocupaciones filosóficas han podido servir de detonador, pero solamente en una situación de inestabilidad determinada por la tentativa infructuosa de extender un paradigma a ciertos fenómenos naturales. Pero también nos enseña líneas de problemas engendradas de manera lúcida y deliberada por preocupaciones filosóficas. Y establece la fecundidad de tal diligencia. El científico no se dedica a comportarse como un sonámbulo kuhniano; puede, sin renunciar a ser un científico, *tomar la iniciativa*, tratar de integrar en las ciencias nuevas perspectivas y cuestiones.

La historia de las ciencias, como toda historia social, es un proceso complejo, en donde coexisten acontecimientos determinados por interacciones locales y proyectos informados por concepciones globales sobre la labor de la ciencia y la ambición del conocimiento. Es también una historia dramática de ambiciones frustradas, de ideas decepcionadas, de realizaciones desviadas de la significación que debían revestir. Einstein, una vez más, puede servirnos de ejemplo; él, que con la relatividad, la cuantificación de la energía, el modelo cosmológico, dio los primeros golpes a la concepción clásica del mundo, aun cuando su proyecto no dejó nunca de ser el regreso de una descripción universal, completa y determinista del mundo físico. Lo que provocó el drama de Einstein es esta distancia no dominable entre las intenciones individuales de los actores y la significación efectiva que el contexto global presta a sus acciones.

6. *La interrogación científica*

Acabamos de abogar porque el carácter sustancialmente abierto de la ciencia sea reconocido y porque, en particular, la fecundidad de las comunicaciones entre interrogaciones filosóficas y científicas deje de verse fustrada por separaciones, o destruida por enfrentamientos. Hemos hablado de la «ratificación» filosófica de las pretensiones de la ciencia clásica, que permitió a ciertos filósofos situar y fijar la gestión científica y darse desde entonces el derecho de ignorarla. Esta estrategia ha sido durante mucho tiempo dominante, a pesar de las protestas como la de Merleau-Ponty cuando escribió lo que, desde un cierto punto de vista, podría constituir la mejor definición de los temas y objetivos de este libro:

«El recurso a la ciencia no tiene necesidad de justificarse: cualquiera que sea la concepción que uno se haga de la filosofía, ésta tiene que elucidar la experiencia, y la ciencia es un sector de nuestra experiencia...; es imposible recusarla con antelación con el pretexto de que trabaja en la línea de ciertos prejuicios ontológicos; si son prejuicios, la ciencia misma, en un vagabundeo a través del ser, encontrará ocasión de recusarlos. El ser se abre paso a través de la ciencia como a través de toda vida individual. Interrogando a la ciencia, la filosofía ganará el encontrar ciertas articulaciones del ser que le será más difícil descubrir de otra manera» [18].

Pero, si ningún privilegio, ninguna precedencia, ningún límite definitivamente fijado detiene de manera estable la diferenciación entre interrogaciones científicas y filosóficas, no por ello es cuestión de identidad entre ellas o de capacidad de ser sustituibles. Pensamos que es cuestión de la complementaridad de saberes que, en los dos casos, constituye la traducción, según reglas más o menos rigurosas, de preocupaciones pertenecientes a una cultura y a una época. La cuestión es, pues, la de las reglas, la de los métodos, la de las ligaduras.

A lo largo de este libro, hemos explorado algunas exigencias a las cuales la interrogación científica está sometida. Por una parte, el diálogo experimental limita en sí mismo la libertad del científico; este último no hace lo que quiere, la naturaleza desmiente las más seductoras de sus hipótesis, las más profundas de sus teorías. De donde, entre otros, el lento ritmo de la ciencia en lo que concierne a la exploración conceptual y a la tentación, siempre presente, de extrapolar al extremo los raros y limitados «síes» que han sido obtenidos de la naturaleza. Hemos visto que el «triunfo» de la ciencia de las trayectorias tiene, de hecho, como límite a un problema tan simple como el de los tres cuerpos. Por otra parte, una segunda ligadura, tan fecunda como la primera, pero puesta en claro más recientemente, es la prohibición de fundamentar una teoría sobre magnitudes que, en principio, se definen como inobservables. Es un giro interesante. La objetividad había sido definida durante tiempo como la ausencia de referencia al observador; se encuentra en adelante definida por una referencia que puede sobrepasarse desde el punto de vista humano: una referencia al hombre, o a la bacteria, por ejemplo, este otro habitante del mundo macroscópico cuyo movimiento constituye una actividad exploradora, ya que supone la orientación en el tiempo y la

[18] M. Merlau-Ponty, *Résumés de cours, 1952-1960*, pp. 117-118.

capacidad de reaccionar irreversiblemente a modificaciones químicas del medio. Nuestra ciencia, definida durante mucho tiempo por la búsqueda de un punto de vista de sobrevuelo absoluto, se descubre finalmente como una ciencia «centrada», las descripciones que produce están asentadas, traducen nuestra situación en el seno del mundo físico.

Es posible que la situación se presente de forma algo distinta en filosofía. Quisiéramos, a este objeto, aventurar un balance y tomar el riesgo de adelantar una hipótesis. A lo largo de este estudio, hemos encontrado nuestra inspiración en un cierto número de filósofos; hemos citado a algunos de ellos que pertenecen a nuestra época, tales como Serres o Deleuze, o también a la historia de la filosofía, tales como Lucrecio, Leibniz, Bergson y Whitehead. No tenemos ninguna intención de proceder a amalgama alguna, pero nos parece que un rasgo, al menos, reúne a los que nos han ayudado a pensar en la metamorfosis conceptual de la ciencia y sus implicaciones, y es la tentativa de hablar del mundo sin pasar por el tribunal kantiano, sin colocar en el centro de su sistema al sujeto humano definido por sus categorías intelectuales, sin someter sus propósitos al criterio de lo que pueda pensar, legítimamente, tal sujeto. En una palabra, se trata de pensadores precríticos o acríticos.

¿Cómo evaluar el hecho de que hayamos encontrado inspiración acerca de filósofos de un pensamiento no centrado alrededor del sujeto humano para pensar en el descubrimiento por la física contemporánea de su carácter centrado? La hipótesis que quisiéramos proponer es ésta: para esos filósofos se trata igualmente de una diligencia *experimental.* No de una experimentación sobre la naturaleza, sino sobre los conceptos y sus articulaciones, una experimentación en el arte de plantear los problemas y de seguir sus consecuencias con el mayor rigor posible.

Whitehead ha expresado claramente esta concepción de la experimentación filosófica con sus grados de libertad, pero también con sus propias exigencias. Así, la filosofía no puede recurrir a la estrategia que fundamenta el diálogo experimental de la ciencia con la naturaleza: la estrategia de elección de lo que es interesante y de lo que puede despreciarse: «La filosofía destruye su propia utilidad cuando se complace en la brillante hazaña de explicar negando» [19].

Vemos que no debemos, en nuestra hipótesis, oponer experimen-

[19] A. N. Whitehead, *Process and Reality*, p. 20.

taciones científicas y filosóficas como opondríamos lo concreto a lo abstracto. Whitehead ha invertido incluso la oposición, reservando a la filosofía la labor de producir, a través del juego de conceptos, las experiencias reales en su riqueza concreta. Y Deleuze llega a hablar, a propósito de tal ambición filosófica, de *empirismo*. «El empirismo no es una reacción en contra de los conceptos, ni una simple llamada a la experiencia vivida. Emprende, por el contrario, la más loca creación de conceptos que jamás se haya visto o escuchado. El empirismo es el misticismo del concepto y su matematismo. Pero precisamente trata al concepto como el objeto de un encuentro, como un aquí y ahora, o más bien, como un *Erewhon* [*N. B.:* lugar utópico, a la vez "aquí y ahora" y "en ninguna parte", imaginado por Samuel Butler], de donde salen, inagotables, los "aquí" y los "ahora" siempre nuevos, distribuidos de otra forma. No hay nadie más que el empirista que pueda decir: los conceptos son las cosas mismas, pero las cosas en estado libre y salvaje, más allá de los "predicados antropológicos". Hago, vuelvo a hacer y deshago mis conceptos a partir de un horizonte movedizo, de un centro siempre descentrado de una periferia siempre desplazada que los mueve y diferencia» [20]. *Erewhon*, inobservable por excelencia, de donde surgen los aquí y ahora, la multiplicidad de las experiencias reales, es aquí, ciertamente, un pensamiento muy extraño para nosotros que hemos hecho de la exclusión de lo que no se puede observar en principio el recurso de un nuevo invento. Y, sin embargo, es pensando lo que no puede observarse, mónadas, clinamen, objetos eternos como, en ciertos casos, los filósofos han «precedido» a la ciencia, han explorado los conceptos y sus implicaciones mucho antes de que esa ciencia pudiera emplearlos o descubriera su potencia ligadora. Este es sin duda el precio del riesgo aceptado por los que no se limitan a utilizar las potencias de la imaginación de forma heurística, para inspirar hipótesis experimentales y teóricas, sino que las llevan a su más alta intensidad por una exigencia exacerbada de coherencia y de precisión.

Aquí también debemos subrayar una convergencia en donde se revela la coherencia cultural de una época. Los filósofos que hemos citado nos han dado, según la expresión de Deleuze [21], los medios de pasar «de la ciencia al sueño e inversamente» porque los ha guiado «la imaginación que atraviesa los dominios, los órdenes y los niveles,

---

[20] G. Deleuze, *Différence et répetition*, p. 4.
[21] G. Deleuze, *op. cit.*, p. 284.

derribando los tabiques, coextensiva al mundo, guiando nuestro cuerpo e inspirando nuestra alma, captando la unidad de la naturaleza y del espíritu». Pero a la inversa, es a la naturaleza y a las ciencias de la naturaleza a las que Deleuze ha recurrido para describir las potencias de la imaginación y escapar a toda referencia al hombre de la filosofía tradicional, sujeto activo, dotado de proyectos, de intenciones, de voluntad. «La idea, escribe, hace de nosotros larvas, que han rebajado la identidad del Yo como el parecido del Ego» [22]. Al querer comprender la «dramatización», el terrible movimiento que recibe aquel al cual una idea aprisiona, en quien una idea se encarna, hace falta pensar en la larva, capaz (contrariamente al organismo constituido, empeñado en una actividad estable) de sufrir movimientos terribles, huellas, deslizamientos, rotaciones; hace falta pensar en estos procesos que intentan describir las ciencias de la naturaleza. «La dramatización se forma en la mente del soñador, pero también bajo el ojo crítico del sabio» [23], la dramatización psicológica encuentra sus ecos en los procesos geológicos, geográficos, biológicos, ecológicos, que crean los espacios, modelan y trastornan paisajes y determinan migraciones, competiciones o amplificaciones mutuas entre procesos de crecimiento, proliferaciones, lentas erosiones y brutales desintegraciones.

7. *La metamorfosis de la naturaleza*

La metamorfosis de las ciencias contemporáneas no es una ruptura. Creemos que por el contrario nos lleva a comprender el significado y la inteligencia de antiguos saberes y prácticas que la ciencia moderna, orientada hacia el modelo de una fabricación técnica automatizada, había creído poder dejar a un lado. Así, Michel Serres ha evocado a menudo el respeto que labradores y marineros alimentan hacia el mundo del cual viven. Ellos saben que no se dan órdenes al tiempo y que no se atropella el crecimiento de los seres vivos, ese proceso de transformación autónoma que los griegos llamaban *physis*. En este sentido, nuestra ciencia ha llegado al fin a ser una ciencia física, ya que por fin ha admitido la autonomía de las cosas, *y no solamente de las cosas vivas*. Hablábamos en la introducción del «nue-

[22] G. Deleuze, *op. cit.*, p. 283.
[23] G. Deleuze, *op. cit.*, p. 282.

vo estado de la naturaleza» que la actividad humana contribuye a hacer existir. Como el desarrollo de las plantas, el desarrollo de esta nueva naturaleza, poblada de máquinas y técnicas, el desarrollo de las prácticas sociales y culturales, el crecimiento de las ciudades, son de esos procesos continuos y autónomos sobre los cuales se puede ciertamente intervenir para modificarlos u organizarlos, pero respetando el tiempo intrínseco, bajo pena de fracaso [24]. El problema planteado por la interacción de las poblaciones humanas y de las poblaciones de máquinas no tiene nada en común con el problema, relativamente simple y dominable, de la construcción de tal o cual máquina. El mundo técnico, que la ciencia clásica ha contribuido a crear, necesita, para ser comprendido, de conceptos diferentes de los de esta ciencia.

Cuando descubrimos la naturaleza en el sentido de *physis*, podemos igualmente empezar a comprender la complejidad de las cuestiones a las cuales se enfrentan las ciencias de la sociedad. Cuando aprendemos el «respeto» que la teoría física nos impone hacia la naturaleza, debemos igualmente aprender a respetar las demás formas de abordar las cuestiones intelectuales, bien sean las aproximaciones tradicionales, las de los marineros y de los labradores, bien sean las aproximaciones creadas por las otras ciencias. Debemos aprender, no a juzgar la población de conocimientos, de prácticas, de culturas producidas por las sociedades humanas, sino a entrecruzarlos, a establecer comunicaciones inéditas entre ellos que nos pongan en condiciones de hacer frente a las exigencias sin precedentes de nuestra época.

¿Cuál es ese mundo en relación al cual hemos vuelto a aprender la necesidad del respeto? Hemos evocado sucesivamente el concepto del mundo clásico y el mundo en evolución del siglo XIX. En los dos casos se trataba de dominio, y del dualismo que opone al que controla y al controlado, al que domina y al dominado. Que la naturaleza sea un reloj o un motor, o que sea también el camino de un progreso que lleva hacia nosotros, ella constituye una realidad estable de la que es posible asegurarse. ¿Qué decir de nuestro mundo que ha alimentado la metamorfosis contemporánea de la ciencia? Es un mundo que podemos comprender como natural en el mismo instante en el que comprendemos que formamos parte de él, pero del cual se han desvanecido, de golpe, las antiguas certidumbres: que se trate de mú-

---

[24] M. Serres, *op. cit.*, pp. 85-86, y «Romain et Faulkner traduisent l'Ecriture», en *La Traduction*, París, Minuit, 1974.

sica, de pintura, de literatura o de costumbres, ningún modelo puede aspirar a la legitimidad, ninguno es exclusivo. En todas partes vemos una experimentación múltiple, más o menos arriesgada, efímera o lograda.

Ese mundo que parece renunciar a la seguridad de normas estables y permanentes es ciertamente un mundo peligroso e incierto. No puede inspirarnos una confianza ciega, sino quizá el sentimiento de esperanza fatigado que ciertos textos talmúdicos han atribuido, según parece, al Dios del Génesis: «Veintiséis tentativas han precedido la génesis actual y todas han terminado en fracaso. El mundo del hombre surge del seno caótico de esos restos anteriores, pero él mismo no posee ninguna etiqueta de garantía: está expuesto, él también, al riesgo del fracaso y del retorno a la nada. "Ojalá éste se mantenga" (Halway Shéyaamod), exclama Dios al crear este mundo y ese deseo acompaña la historia ulterior del mundo y de la humanidad, subrayando desde el principio que esta historia está marcada con el signo de la inseguridad radical» [25].

Es este clima cultural el que nutre y amplifica el descubrimiento de objetos insospechados, cuásars de formidables energías, fascinantes agujeros negros y también el descubrimiento, en la tierra, de la diversidad de experiencias que la naturaleza realiza; en una palabra, el descubrimiento teórico de los problemas de inestabilidad, de proliferaciones, de migraciones, de estructuraciones. Allí en donde la ciencia no había mostrado una estabilidad inmutable y pacificada, comprendemos que ninguna organización, ninguna estabilidad está, en tanto que tal, garantizada o legitimada, ninguna se impone de derecho, todas son producto de las circunstancias y están a merced de las circunstancias.

Desde este momento, Jacques Monod tenía razón, la antigua alianza animista está bien muerta y con ella todas las que nos presentaban como sujetos voluntarios, conscientes, dotados de proyectos, encerrados en una identidad estable y costumbres bien establecidas, ciudadanos en el seno de un mundo hecho para nosotros. Está bien muerto el mundo con finalidad, estático y armonioso, que la revolución copernicana destruyó cuando lanzó la Tierra hacia los espacios infinitos. Pero nuestro mundo no es tampoco el de la «alianza moderna». No es el mundo silencioso y monótono, abandonado por los

---

[25] A. Neher, «Vision du temps et de l'histoire dans la culture juive», en *Les cultures et le temps*, París, Payot, 1975, p. 179.

antiguos encantos, el mundo reloj sobre el cual habíamos recibido jurisdicción. La naturaleza no está hecha para nosotros y no se ve entregada a nuestra voluntad. Ha llegado el momento, como nos lo anunciaba Jacques Monod, de asumir los riesgos de la aventura de los hombres, pero si podemos hacerlo es porque, en adelante, así es nuestra forma de participación en el devenir cultural y natural, así es la lección que nos dicta la naturaleza cuando la escuchamos. El conocimiento científico, sacado de los sueños de una revelación inspirada, es decir, sobrenatural, puede también descubrirse hoy en día como una «escucha poética» de la naturaleza y proceso natural dentro de la naturaleza, proceso abierto de producción y de invención, en un mundo abierto, productivo e inventivo. Ha llegado el momento de nuevas alianzas, ligadas desde siempre, durante mucho tiempo desconocidas, entre la historia de los hombres, la historia de sus sociedades, de sus conocimientos y la aventura exploradora de la naturaleza.

Apéndice I
LA INQUIETUD DEL TIEMPO

¿Qué es el tiempo? En la conclusión de este libro hemos recordado el veredicto dado por Einstein en relación al tiempo bergsoniano y su convicción según la cual la distinción entre pasado, presente y futuro no es más que una ilusión, una ilusión tenaz. Esta convicción, tan fundada como era para Einstein, ¿podía satisfacer verdaderamente a este hombre de exigente honradez? Tenemos un curioso testimonio de la inquietud del tiempo que él expresó a un interlocutor tranquilamente convencido de la certidumbre de la ciencia. Carnap nos cuenta cómo Einstein le confió un día «que el problema del Ahora le preocupaba intensamente. Explicó que la experiencia del Ahora significa algo especial para el hombre, algo esencialmente diferente del pasado y del futuro, pero que esta importante diferencia no tiene, ni puede tener, un sitio en física. Le parecía que el hecho de que esta experiencia no pueda encontrar un significado en la ciencia había de ser aceptado con resignación, como penoso, pero inevitable. Yo indicaba que todo lo que se produce objetivamente puede ser descrito por la ciencia; por una parte, la secuencia temporal de los acontecimientos es descrita por la física y, por otra parte, las particularidades de las experiencias humanas respecto al tiempo, incluida la diferente actitud del hombre ante el pasado, el presente y el futuro, pueden ser descritas y, en principio, explicadas en psicología. Pero Einstein opinaba que estas descripciones científicas no son susceptibles de satisfacer nuestras ne-

cesidades humanas y que existe algo esencial acerca del Ahora que escapa al dominio de la ciencia» [1].

Sin duda, encontramos esta inquietud del tiempo en la reacción de Einstein frente al modelo cosmológico presentado por Goedel, en el que un observador que prolongara su trayectoria cuatridimensional en el espacio/tiempo podría finalmente volver a entrar en su propio pasado. Así como pudo creerse que Carnap se conformó con el juicio de Einstein sobre el tiempo, Goedel podía pensar que su universo atemporal agradaría al padre de la relatividad general. Sin embargo, Einstein, después de recordar que no se puede telegrafiar al pasado, escribe: «Lo esencial aquí es que el hecho de enviar una señal es, en termodinámica, un proceso irreversible, conectado al aumento de la entropía [cuando, según nuestro conocimiento actual, todos los procesos elementales son reversibles]» [2].

El sentido íntimo del tiempo escapa a la competencia científica; el tiempo irreversible de la termodinámica convocada como argumento en un problema cosmológico: ¡estas posturas pueden parecer paradójicas por parte de Einstein! Es propio de la «inquietud del tiempo» trastornar las teorías que intenta apaciguarla y dominarla. Los síntomas de esta inquietud acompañan a la física moderna desde que Clarke, representante de Newton, defendiera, contra Leibniz, la necesidad de pensar en un mundo en el que se producen *acontecimientos nuevos*, en el que la espontaneidad de los seres vivos y la libertad humana encuentran su significado. En aquella época, la forma de conceptualización del cual era portadora la dinámica, le puso en contra de las convicciones del más célebre de sus padres y el sistema newtoniano hizo inaudible el pensamiento de Newton. Hoy tenemos la posibilidad de prestar atención a esta inquietud, de transformar este doloroso síntoma devolviéndole su poder creativo.

Las teorías físicas deben su poder y su inventiva a la experimentación conceptual que permite su formalismo abstracto. Ello es debido a que los modelos a partir de los cuales se puede intentar y poner a prueba nuevas disposiciones conceptuales desempeñan un papel muy importante. El capítulo noveno de este libro, *Hacia la síntesis de lo simple y de lo complejo,* giraba en torno a uno de estos modelos, el de la «transformación del panadero». En su época, este modelo sólo había comenzado a revelar su gran fecundidad. Lo retomaremos para exponer lo que, más tarde, nos ha permitido comprender.

Recordemos en pocas palabras el principio de la transformación del panadero (cf. figura 16). Un cuadrado simula el espacio de fases de un sistema.

[1] *The Philosophy of Rudolph Carnap,* editado por P. A. Schilipp, Cambridge, University Press, 1963.

[2] *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* editado por P. A. Schilipp, Evanston, Illinois, Library of Living Philosophers, 1949, p. 688.

A cada uno de sus puntos le corresponde un posible estado de ese sistema. La ley de evolución del sistema en cuestión viene definida por la recomposición que sufre el cuadrado en cada transformación, transformación que desplaza cada uno de sus puntos de forma determinada: aplastamiento del cuadrado en un rectángulo cuya longitud es el doble y cuya altura es la mitad del lado del cuadrado y después la recomposición de un nuevo cuadrado por superposición de las dos mitades del rectángulo.

Esta transformación no pertenece a la dinámica hamiltoniana, pero comparte con ella algunas de sus principales propiedades: el carácter unívoco de la transformación (se mantiene la superficie del cuadrado, quedando dos puntos distintos), determinismo y reversibilidad (la transformación inversa devuelve todos los puntos a su posición original). Más exactamente, como ya lo hemos mostrado, la transformación del panadero genera una evolución análoga a la de los sistemas dinámicos *inestables:* dos puntos infinitamente cercanos, a lo largo de varias transformaciones, siempre acabarán por conocer destinos divergentes: los diferentes puntos de una región, por pequeña que sea, se dispersarán progresivamente a través de todo el espacio de fases.

La transformación del panadero nos enfrenta con la dificultad esencial que debemos resolver. La evolución que determina puede hacer que una región del espacio de fases se fraccione indefinidamente (en una transformación dinámica se deformaría, tomaría el aspecto filamentoso representado en la figura 15), pero la superficie total de la región se mantiene. La evolución temporal, aunque tenga los rasgos de un huracán, haciendo pedazos y dispersando todo lo que encuentra a su paso, los pedazos están siempre ahí, dispuestos, aparentemente, a encontrar su configuración original si se aplica una sucesión de transformaciones inversas. En otras palabras, el lenguaje formal que hemos empleado para representar la transformación del panadero, basado en la descripción de los puntos y en sus desplazamientos, no puede dar sentido a un devenir irreversible. ¿Pero qué significa la correspondencia entre un estado de un sistema y un punto en el caso de una transformación de este tipo?

La transformación del panadero puede representarse de manera abstracta mediante lo que se denomina «desfase de Bernoulli», es decir, el resultado de la transformación en cada punto, la transformación de los valores y de sus coordenadas puede obtenerse mediante un sencillo juego de escritura sobre las coordenadas iniciales. El juego es simple, pero en la medida en que la transformación del panadero multiplica y después divide por dos, las coordenadas deben escribirse en código binario: cada coordenada será representada por un cero (la longitud del lado del cuadrado es uno) seguido de una secuencia de decimales formada por ceros y unos; la primera cifra después de la coma es cero si la coordenada se encuentra entre 0 y 0,5 y 1 en los demás casos; el segundo decimal, del mismo modo, sitúa la coordenada dentro de este primer intervalo; de esta forma, será 0 si la coordenada se encuentra entre 0 y 0,25 ó entre *0,5 y 0,75; y así sucesivamente.* (Señalemos que po-

dríamos mantener la representación habitual de las coordenadas, esto es, en base decimal, pero entonces la transformación debería aplastar el cuadrado en un factor de diez, reconstituyéndolo mediante la superposición de diez pequeños rectángulos...[3]). Al representar las coordenadas en código binario, la transformación de las dos coordenadas que representan un punto se convierte en un juego de niños: basta elevar al número que representa la coordenada «de dilatación» (que hemos definido de forma convencional como la cantidad de movimiento, *p)* su primera cifra detrás de la coma y añadir esta cifra detrás de la coma de la coordenada denominada «de contracción» (que aquí se identifica convencionalmente con la coordenada de posición, *q).* Todo ocurre como si la definición de los dos números estuviera desfasada en cada transformación, el primer decimal de uno se convierte en el primer decimal del otro y todos los demás decimales se desfasan (para la coordenada de dilatación, un decimal de rango n, s_n, se convierte en decimal de rango $n-1$, s_{n-1}; para la coordenada de contracción, s_n *se convierte en* s_{n+1}).

El desfase de Bernoulli manifiesta claramente el problema que plantea la definición de un punto en un sistema dinámico inestable. Si pudiéramos definir un punto y, en particular, su coordenada de dilatación con una precisión positivamente infinita, la secuencia de s_n sería infinita y la trayectoria perfectamente determinista volvería a desfasar infinitamente los decimales. Pero si definimos las coordenadas con una cifra que tenga un número finito de decimales, la secuencia de los s_n será también de longitud finita. Y, después de un número determinado de transformaciones, no conoceremos el valor de los decimales de la coordenada de dilatación que «retroceden» hacia la coma y después pasan a la coordenada de contracción. Después de un número de transformaciones suficientemente grande (es decir, un tiempo suficientemente largo), nos veremos en la incapacidad de predecir la trayectoria del punto.

La representación de la transformación del panadero en términos de puntos de trayectorias supone implícitamente una precisión infinita en la definición de estos puntos. Entraña la gran dificultad conceptual que Pierre Duhem fue uno de los primeros en señalar en *La théorie physique, son objet, sa structure,* cuando escribió[4]: «Una deducción matemática no es útil para el físico en tanto en cuanto se limite a afirmar que una proposición, *rigurosamente* cierta, tiene como consecuencia la exactitud *rigurosa* de otra proposición. Para serle de alguna utilidad al físico, hay que probar que la segunda proposición es *más o menos* exacta cuando la primera es solamente *más o menos* cierta.»

Citemos a Duhem, que describe de manera vivaz el problema del físico

---

[3] Es la solución que adopta Ekeland en *Le calcul et l'imprévu,* París, Seuil, 1984.

[4] P. Duhem, *La théorie physique, son objet, sa structure,* reeditado por Vrin, París, p. 214.

de sistemas dinámicos inestables a partir del ejemplo de la «cara de toro» estudiado por Hadamard: sistema en el que las trayectorias (o geodésicas) pueden ser periódicas (girar alrededor de los cuernos o de las orejas), o alejarse hacia el infinito (a lo largo de un cuerno o una oreja): «Por más que aumente la precisión con la que se determinan los datos prácticos, o se haga más pequeña la marca de la posición inicial del punto material, o se estreche el haz que comprende la dirección inicial de la velocidad, la geodésica que permanece a una distancia finita girando sin cesar alrededor del cuerno derecho nunca podrá apartarse de sus infieles compañeros, los cuales, después de girar como ella alrededor del mismo cuerno, se separarán indefinidamente. El único efecto de esta mayor precisión en la fijación de los datos iniciales será el obligar a estas geodésicas a dar un mayor número de vueltas alrededor del cuerno derecho antes de partir al infinito; pero esta partida no podrá evitarse nunca [5].»

Para Duhem, cuando la introducción de las palabras «más o menos» hace perder su significado a la deducción matemática, ésta queda condenada a la «eterna esterilidad». La transformación de la descripción dinámica que presentamos aquí vuelve a invocar esta condena y propone para los sistemas dinámicos inestables otro tipo de definición y, por tanto, de deducción, que les devuelva el carácter esencial de toda representación matemática de la física, su necesaria resistencia al más o menos. No nos sorprenderá que esta nueva representación sea de naturaleza probabilística. Los sistemas dinámicos inestables responden exactamente las condiciones definidas por Poincaré para la aplicación de las probabilidades: pequeñas causas pueden tener grandes efectos.

Hemos introducido (pp. 278-286) el concepto de edad interna que describe un sistema regido por la transformación del panadero no a partir de sus puntos y trayectorias, sino a partir de su grado de fragmentación medido a partir de una situación de referencia denominada «partición generatriz». Como ya hemos dicho, este tipo de representación conviene al estudio de la evolución de la distribución estadística que caracteriza la probabilidad de que el sistema estudiado sea representado por los puntos que pertenecen a tal o cual región del cuadrado. Hemos podido, pues, definir un operador «tiempo interno» que actúa sobre la función de distribución y cuya edad interna sería el valor propio correspondiente. En este contexto, es fácil constatar que la transformación del panadero lleva al equilibrio estadístico. Después de muchas transformaciones, la partición inicial se reparte sobre el cuadrado y se encuentran puntos representativos del sistema en cualquier región de este cuadrado, por pequeña que sea.

Sin embargo, esta primera representación todavía podría parecer ambigua, como el propio concepto de probabilidad. Una serie de transformacio-

[5] P. Duhem, *op. cit.*, p. 211.

nes inversas a partir de la partición inicial, simbolizando una evolución «hacia el pasado», lleva *también* al equilibrio estadístico. Por esta razón es necesaria una transformación más fundamental del concepto de representación de un sistema físico que rompa la simetría temporal entre el pasado y el futuro y, correlativamente, el carácter dominante de la idea de *conservación* en la inteligibilidad de la evolución dinámica. Por tanto, definiremos una representación que ya no esté normatizada por el carácter unívoco de la transformación del panadero: en tanto en cuanto actúa sobre puntos, transformándolos en otros puntos, las superficies que los contienen permanecen invariables (teorema de Liouville), incluso aunque se fragmenten indefinidamente.

Toda superficie de magnitud finita se conserva en la transformación del panadero, como en todas las transformaciones dinámicas clásicas. Señalemos de paso que la teoría de Liouville, que condena la posibilidad de construir una función de entropía a partir del espacio de fases definido de manera clásica (ver p. 236), no escapa a las dificultades conceptuales asociadas al carácter finito de la precisión con la que se puede definir un sistema. Supongamos que r mide el poder de resolución del que disponemos (r es tan pequeño como se quiera) y supongamos que se puede definir la región del espacio de fases que contiene los puntos representativos del sistema mediante un pequeño cuadrado cuyo lado tiene una magnitud aproximada a r. Apliquemos la transformación del panadero. El cuadrado de lado r se verá transformado en un rectángulo de longitud $2r$ y de altura $1/2r$; esta altura «contraída» escapará al poder de resolución y al rectángulo deberá atribuírsele una altura r y, por tanto, una superficie doble. A este aumento de la superficie corresponde la posibilidad de definir una entropía creciente. Por tanto, vemos que el teorema de Liouville, como representación de un sistema por un punto, plantea problemas de aplicación cuando se toma en cuenta la naturaleza finita de la información de que disponemos acerca de un sistema. Ahora se trata de definir un modo de representación que escape tanto a la idealización del punto como a la idealización del teorema de Liouville.

Existe un ser geométrico que escapa, por definición, a la conservación de las superficies que caracteriza la transformación del panadero: las *líneas* (que contienen infinitos puntos, pero cuya superficie es cero). Examinemos la figura 26. Una línea horizontal inicial se multiplicará por dos con cada transformación y, por tanto, como consecuencia de un gran número de transformaciones, cubrirá la totalidad del cuadrado: la llamaremos «fibra dilatadora»; una línea vertical se contraerá progresivamente hasta tender hacia un punto, después de un gran número de transformaciones: la llamaremos «fibra contractora». La definición de condiciones iniciales como fibras y no como superficies nos permite «evitar» la condición fundamental de conservación que expresa el teorema de Liouville.

Por otra parte, las fibras contractoras y dilatadoras, en la medida en que ya no están sometidas a la idea de conservación, son capaces de dar significado a lo que las probabilidades debían presuponer: la ruptura de simetría

temporal, la no-equivalencia entre pasado y futuro. Una fibra dilatadora (horizontal) permite representar una evolución que tiende hacia el equilibrio en el futuro pero no en el pasado (las transformaciones inversas la contraen); una fibra contractora permite representar un sistema que remontando hacia su pasado, remonta hacia un estado de equilibrio. *Por tanto tenemos dos «actualizaciones» diferentes* de la dinámica y cada una de ellas integra el significado del tiempo. Cuando la caracterización de un sistema mediante la superficie que constituyen los puntos que pueden representarla era neutra respecto al tiempo, la representación del sistema mediante una fibra integra, por definición, dependiendo de que dicha fibra sea dilatadora o contractora, el sentido de la evolución temporal del sistema. La fibra no hace que desempeñen un papel simétrico el pasado y el futuro, el antes y el después, sino que relaciona, en su propia definición, el estado instantáneo y la evolución temporal a la que pertenece dicho estado.

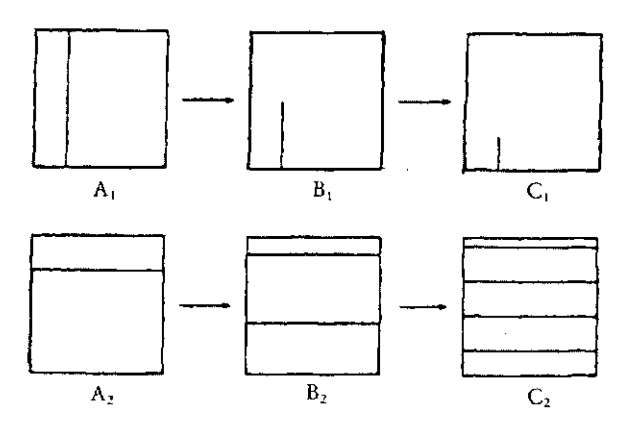


Figura 26. Fibra contractora (secuencia A_1, B_1, C_1) y dilatadora (secuencia A_2, B_2, C_2) en la transformación del panadero.

Esta propiedad de las fibras contractoras y dilatadoras es característica del cambio de representación que se ha definido para los sistemas dinámicos inestables (ver pp. 289-290). Se ha construido un operador $\wedge$, a partir del operador tiempo interno, que transforma la función de distribución estadística que representa el sistema inestable en una nueva función de distribución [6]. Esta última, al contrario que la primera, está sometida a dos leyes de

[6] B. Misra, I. Prigogine y M. Courbage, «From Deterministic Dynamics to Probabilistic Descriptions», en *Physica*, vol. 98 A, 1979, pp. 1-26; I. Prigogine y Y. Eyskens, «Irreversibility, Stochasticity and Non-Locality», a publicar en un volumen de homenaje a David Bohm, Londres, Routledge and Kegan Paul, 1986.

evolución distintas según la dirección del tiempo. Las fibras dilatadoras y contractoras se convierten en las unidades de descripción fundamentales. En particular, una función de distribución nula en todas partes salvo en un punto que, por tanto, corresponde al ideal de descripción infinitamente precisa, se transformará en un fragmento de fibra contractora: todos sus puntos tienen, por definición, el mismo destino, el que habría tenido el punto aislado de la definición clásica. De forma más general, la transformación $\wedge$ implica una deslocalización del sistema dinámico, la transformación de una trayectoria en una colección de trayectorias, pero no implica pérdida alguna de información.

Esta transformación $\wedge$, que rompe la simetría temporal de la evolución dinámica es, a diferencia de las transformaciones usuales en las que se basa la dinámica, una transformación *no* canónica (ver p. 105). Todas las transformaciones canónicas respetan el teorema de conservación de Liouville. La transformación no canónica $\wedge$ da sentido a una evolución dinámica que no dispersa solamente los puntos representativos de un sistema a través de todo el espacio de fases, sino que, al igual que la fibra dilatadora, lleva la nueva función de distribución a invadir este espacio de fases; esta transformación no canónica implica, como ya hemos visto, una deslocalización del sistema en el espacio de fases: transforma una distribución localizada, que no sería diferente de cero más que en un punto del espacio de fases, en una nueva distribución deslocalizada. Correlativamente, transforma la «localización» del estado instantáneo en relación con el pasado y el futuro. Cuando un estado, en la idealización clásica, puede asimilarse a un corte sin espesor que separe simétricamente pasado y futuro y que los contenga a ambos potencialmente, llegamos a una doble definición del estado instantáneo, según la dirección de la evolución a la cual pertenece. En la evolución orientada hacia el futuro, el estado instantáneo se relaciona con el pasado que lo produjo y actúa sobre el futuro: no nos da acceso a todo el futuro, sino solamente a un futuro cuyo grado de proximidad traduce la dinámica del sistema.

Desde Aristóteles, los conceptos de instante y de estado instantáneo se relacionan entre sí. En este sentido, hay que decir que, de la misma forma en que el estado incluye en su definición la evolución a la que pertenece, el instante «recuerdo del pasado y acción sobre el futuro» incluye una noción de la duración esencialmente diferente del tiempo «axial» de la física tradicional.

El tiempo interno de un sistema intrínsecamente irreversible fluye en la dirección de la fibra dilatadora. Para que un sistema pueda calificarse de «intrínsecamente irreversible», se necesita una condición más. Hemos introducido las fibras contractoras y dilatadoras como si la ruptura de simetría temporal que expresan diera lugar efectivamente a dos actualizaciones equivalentes de la dinámica. Pero el segundo principio de la termodinámica significa que, de hecho, las fibras «contractoras, que caracterizan una evolución que aleja *indefinidamente* el sistema del equilibrio, han sido excluidas. Por

tanto, el segundo principio, en su interpretación dinámica, se convierte en un principio de *selección de las condiciones iniciales*, que niega la existencia física y la posibilidad de una preparación de sistemas que podrían ser representados mediante una fibra contractora [7].

¿Hemos vuelto a la exclusión de tipo puramente factual que significó el fracaso de Boltzmann? ¿Se trata simplemente de excluir la clase de evoluciones dinámicas que contradicen el segundo principio sin otra razón que la propia contradicción? No, porque nosotros podemos ahora caracterizar de forma intrínseca la clase de contradicciones iniciales excluidas. Entre los estados iniciales posibles y los prohibidos se eleva una *barrera entrópica infinita*, es decir, una barrera que ningún avance tecnológico ni ninguna experiencia de pensamientos podrá anular. En efecto, podemos mostrar que, al contrario que la fibra dilatadora, la contractora requiere una cantidad infinita de información. En otras palabras, si bien una cierta imprecisión en la preparación de un sistema cuyo estado podría ser descrito por una fibra dilatadora no impide que la fibra que lo representa se dilate, la menor imprecisión, por mínima que sea, en cuanto a la preparación de un sistema que corresponde a una fibra contractora, es suficiente para que esta fibra vuelva a un comportamiento «dilatador», es decir, a mostrar una evolución que, al final, termina por llevar al equilibrio.

En lo que concierne a la transformación del panadero, la demostración es muy abstracta. Preferimos recurrir a una analogía más intuitiva, la de un sistema constituido por esferas rígidas. Señalemos además que las peculiaridades de la transformación del panadero esquematizan de manera abstracta el mecanismo de evolución de un sistema de esferas rígidas. En cada etapa, un punto puede sufrir dos tipos de transformación: una continua, si sus coordenadas simplemente se han dilatado horizontalmente y contraído verticalmente, y otra discontinua, si forma parte del segundo semi-rectángulo que acaba de superponerse al primero. De la misma forma, de un instante a otro, un sistema de esferas rígidas puede transformarse solamente por el movimiento (continuo) de las esferas o por las colisiones entre algunas de estas esferas, lo cual corresponde a una transformación discontinua del estado del sistema.

Nuestra analogía da sentido a la distinción entre coordenadas dilatadora y contractora a la que se había desprovisto de contenido físico en la transformación del panadero. Lo cual implica, en primer lugar, obviamente, una representación de la colisión que da sentido a la ruptura de simetría que rea-

[7] M. Courbage e I. Prigogine, «Intrinsic Randomness and Intrinsic Irreversibility in Classical Dynamical Systems», en *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 80, 1983, pp. 2412-2416; I. Prigogine y C. George, «The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems», en *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 80, 1983, pp. 4590-4594.

lizan las fibras dilatadoras y contractoras, es decir, una representación de la colisión que permite distinguir el «antes» del «después». La formalización de esta distinción es también abstracta, pero se le puede dar un significado intuitivo. Ya hemos hecho alusión al problema de la inversión de velocidades que afrontó Boltzmann (pp. 233-234). Si bien la evolución «normal» que lleva las partículas hacia el estado de equilibrio en el que la distribución de las velocidades responden a la distribución de Maxwell, permite la hipótesis del caos molecular, esto es, partículas independientes unas de otras que colisionan, no ocurre lo mismo con la evolución que sigue a la inversión de las velocidades de estas partículas y que aleja el sistema del equilibrio. En este caso, hay que tener en cuenta que estas partículas, antes de sus colisiones, son *correlativas:* el efecto de sus colisiones no responde ya a las predicciones estadísticas, sino que genera una evolución singular de entropía decreciente. Por tanto, podemos concluir que, durante una evolución normal hacia el equilibrio, las colisiones tienen un efecto doble: acercan la distribución de las velocidades que caracteriza la población de las partículas a la distribución de equilibrio y crean correlaciones entre partículas. Dichas correlaciones no suelen tener ningún efecto pero, en el caso de que se inviertan las velocidades, son ellas las que dominan la evolución del sistema y producen una evolución que aparta la distribución de las velocidades de la distribución de Maxwell.

Tenemos aquí un ejemplo de lo que significa una representación del estado de un sistema que la incluye en su devenir. Desde el punto de vista clásico, no puede definirse ninguna diferencia fundamental entre un estado y el estado que resulta de la inversión simultánea de todas las velocidades de las partículas del primero. En la representación que rompe la simetría, ambos estados son completamente distintos. Uno pertenece a una evolución en la que las partículas no correlacionadas entran en colisión y crean correlaciones y el otro a una evolución en la que las partículas correlacionadas entran en colisión y destruyen estas correlaciones «precolisionales» y en la que la distribución de las velocidades se aleja de la distribución de equilibrio. La dirección en que fluye el tiempo tiene por tanto un significado simple, es la dirección según la cual las colisiones se transforman en correlaciones y no a la inversa. Obviamente, las evoluciones que transforman las correlaciones en colisiones no se excluyen por nuestra definición del segundo principio como principio de selección de las condiciones iniciales. A fin de cuentas, se pueden realizar por simulación numérica o en laboratorios (ecos de espín). Lo que se excluye es la preparación de un sistema de partículas correlacionadas de forma que su evolución se aleje *indefinidamente* del equilibrio y no durante un tiempo finito. Dicho estado sería representable por una fibra contractora e implica una información infinita. La menor imprecisión, el menor decimal despreciado en la simulación numérica (que, por definición, calcula sobre números con decimales finitos) es suficiente para que, al final, el sistema encuentre una evolución normal que le lleve al equilibrio.

La definición del segundo principio como principio de selección implica,

por tanto, el abandono de una presuposición desde el punto de vista clásico: el carácter arbitrario de las condiciones iniciales de una evolución. En la representación de simetría rota, podemos asociar a cada condición inicial una cantidad de información que depende, no de los medios que hemos empleado para conocerla, sino más bien de la dinámica intrínseca del sistema. El carácter inestable de esta dinámica condenaba la idealización que constituye la representación de un sistema por un punto en el espacio de fases y es él también el que expresa la exclusión de estados que serían representados por fibras contractoras. Del mismo modo que no podemos describir un sistema con una precisión positivamente infinita, no podemos controlarlo hasta el punto de determinar la creación de ciertos tipos de correlación, que mantendrían en permanencia un sistema aislado lejos del equilibrio. Y, por otra parte, como se puede demostrar, nunca se producirán dichas correlaciones espontáneamente en el interior de un sistema; una evolución dinámica nunca llegará a crear un estado excluido en virtud del segundo principio de la termodinámica. La exclusión de dichos estados no es deducible de la dinámica, sino que se propaga por ella.

El segundo principio de la termodinámica siempre ha significado que los diferentes tipos de evolución no eran equivalentes entre sí, pero pesaba una gran ambigüedad sobre la cuestión de saber si esta no-equivalencia era signo de nuestras limitaciones o una propiedad intrínseca de lo que estamos tratando. En la perspectiva de la dinámica centrada alrededor de la idealización que permiten los sistemas estables, no había posibilidad de escapatoria. La no-equivalencia sólo podía provenir de nosotros mismos. El segundo principio de la termodinámica interpretado como principio de selección de las condiciones iniciales no es, como tal, deducible de la dinámica. Necesita una condición fundamental, la inestabilidad del sistema dinámico y un ingrediente adicional que es precisamente la exclusión de ciertos tipos de condiciones iniciales. Pero este ingrediente no es ajeno a la dinámica, representa la diferenciación intrínseca entre condiciones iniciales que permite ahora expresar el formalismo dinámico. Por tanto, el segundo principio nace de la no-equivalencia entre condiciones iniciales, que es de naturaleza propiamente dinámica.

Ciertamente existe en esta *no-equivalencia* un elemento de choque, incluso de escándalo, con respecto a aquello a lo que nos tenía acostumbrados la dinámica clásica, desde el principio, desde que Leibniz asignó como único límite a la libertad de Dios al crear el mundo, su bondad que le hizo «preparar» el mejor de los mundos posibles. La idea de que las condiciones iniciales de un sistema no están sujetas a ningún límite en particular o, dicho de otra forma, que un sistema «convenientemente preparado» puede explorar cualquier región del espacio de fases, representando en sí mismo la sumisión de la evolución al estado, del «devenir» al «ser». Encontramos aquí la antigua asociación entre carácter integralmente controlable y atemporalidad, la reducción del devenir al estado. Los filósofos han discutido larga-

mente si es el proyecto de concebir un mundo dominable, como sometido a la dominación del que lo conoce, el que tiene como consecuencia la eliminación del devenir, o si es el proyecto de eliminar el devenir el que prima. En todo estado de causa, la dinamica unía los temas del control y de la eliminación del devenir de manera intrínseca. Todo progreso en el descubrimiento de este «universo de la precisión», como la verificación de la rigurosa identidad entre masas gravitacional e inercial, confirmaba estos dos temas inseparables. Inversamente, la dinámica que hoy da sentido a un mundo de procesos lleva, indisociablemente, a reconocer la distinción entre lo que escapa al control entendido a la manera de los fundadores de la dinámica y lo que está sujeto a él.

Correlativamente, el ideal de inteligibilidad de la dinámica se transforma. El ideal tradicional nos situaba en la perspectiva de un progreso técnico en la precisión de las medidas que nos acercaría indefinidamente a la situación que simbolizaba el diablillo calculador, poseedor de la verdad objetiva del mundo. Pero la imposibilidad que pone ahora en escena el segundo principio no es tan fácil de eliminar por un progreso técnico cualquiera. No nos devuelve a un estado histórico de la técnica, sino al propio concepto de lo que es una descripción cuantitativa y de lo que es una manipulación. Toda descripción cuantitativa es, por naturaleza, aproximada. Toda manipulación utiliza una cantidad finita de información. Ya hemos hablado de la ciencia como una «escucha poética» de la naturaleza, y poética se refiere no a la inspiración que permite el salto de lo finito a lo infinito, sino a la descripción, al cálculo, a la manipulación como *prácticas*. Por tanto, son las limitaciones de una escucha «poética» en este sentido las que ahora constituyen el modelo de nuestras teorías científicas.

Hablamos de limitaciones porque no se trata del reconocimiento de un límite general que tuviera sólo consecuencias generales para todos los enunciados científicos. Por el contrario, una limitación no tiene significado ni lo produce sino en situaciones específicas. Esto es lo que recordaba Niels Bohr cuando mostró que, de manera general, las operaciones de medida de la posición y cantidad de movimiento implican exigencias lógicamente contradictorias, pero que esta contradicción general no se convertía en una limitación que tuviera sentido a escala cuántica, en la que la existencia de la constante h se opone al ideal de una interacción despreciable entre objeto y aparato de medida. El quantum de acción *actualizaba* el problema lógico. Asimismo, si la estabilidad había sido la regla para los sistemas dinámicos, si el péndulo había sido efectivamente un modelo representativo de dichos sistemas, el problema planteado por los límites inherentes a toda descripción cuantitativa había quedado desfasado. Un juicio general sería posible en el comportamiento dinámico, definido como reversible y determinista, y en el concepto de estado dinámico que contiene toda la evolución pasada y futura del sistema. La inestabilidad dinámica, que despoja al péndulo de su estatus de sistema representativo para hacer de él un caso límite singular de una descripción

más general, otorga un significado intrínseco a los límites que definen descripción y manipulación. Y esta limitación, a su vez, se descubre como productora de significado, ya que permite la puesta al día de diferencias intrínsecas que disimulaban la idealización clásica.

La inquietud del tiempo no es ajena a ninguna práctica humana. Y sin duda podemos encontrarla en la obra de los físicos que forjaron la representación de un tiempo tranquilo, acompasado por la tansición regular de un estado instantáneo a otro, y también en aquellos que aceptaron este veredicto de la física, la negación del mundo observable, imprevisible y productor de novedad, en nombre de la eternidad desgranada por una sucesión monótona. ¿Cómo no reconocer la belleza de esta visión que continúa obsesionado a tantos físicos? ¿Cómo no comprender la resistencia que provoca la idea de abandonar tal idea? Pero la inquietud no se ha dejado apaciguar. Sus síntomas se han manifestado a lo largo de la historia de la física a través de la insistente cuestión del segundo principio. ¿Podrá mañana modificar las propias bases de la física? Nadie puede hoy dar una respuesta segura, que deberá ser el resultado de largos trabajos teóricos y experimentales. Pero podemos definir ya un tema, que ya hemos abordado en su aspecto técnico, por la definición de una transformación que rompe la dominación del teorema de Liouville, es decir, que libera al concepto de la evolución física de las categorías de conservación e identidad. Es este un primer paso hacia un mundo de transformaciones que ya no están sujetas a la norma de inter-equivalencia. Un mundo de procesos, quizá próximo al mundo «químico» que los materiales del siglo XVIII contraponían al mundo legal de los mecanicistas. Un mundo inquieto, del que ningún saber podrá proporcionarnos la teoría unitaria, pero al que ya no nos opondrá la inquietud del tiempo que nos ocupa.

Apéndice II
NUEVAS VIAS DE DIALOGO CON LA NATURALEZA

En un famoso texto, Freud hablaba del drama que han causado a la «megalomanía» humana tres descubrimientos de la ciencia: la tierra despojada de su estatus del centro del Universo para convertirse en un planeta insignificante; el hombre despojado de su estatus de rey de la creación para convertirse en un animal como tantos otros, primo de los monos primates y, por fin, el yo, despojado de su estatus soberano por la teoría del inconsciente. Estos sucesos son irreversibles, pero su significación puede transformarse. En donde dominaba el sentimiento de pérdida, puede venir a sustituirla el interés, la pasión por cuestiones que no interponen ya certidumbres demasiado tranquilizadoras.

No podremos dar aquí nada más que algunas ideas generales sobre las cuestiones que renuevan y multiplican las vías de diálogo con la naturaleza. A través de ellas, intentaremos mostrar que nuestras ciencias pueden ahora prescindir de una connotación que suele ir unida a los descubrimientos mencionados por Freud: la Tierra no sería *nada más que* un planeta entre otros muchos, el hombre no sería *nada más que* un animal, el yo no sería *nada más que* una dimensión parcial y huella de ilusiones de la vida física [1].

La expresión «nada más que» ha marcado siempre la retórica reduccionista. Queremos mostrar, a través de los nuevos caminos abiertos al diálogo

[1] S. Freud, *Introduction à la psychanalyse*, París, Petite Bibliothèque Payot, 1975, p. 266.

con la naturaleza, que esta retórica ya no puede reivindicar para sí la autoridad de la ciencia.

En la perspectiva clásica había una distinción clara entre lo que podía considerarse simple y lo que debía reconocerse como complejo. Se calificaba sin vacilar a las leyes newtonianas de «simples», como al comportamiento de los gases perfectos o las reacciones químicas. Se hablaba de complejidad en cuanto a los seres vivos y, por supuesto, en cuanto a las prácticas humanas. En esta perspectiva, se trataba de saber si, al menos en principio, esta complejidad podía «reducirse» a la simplicidad de los comportamientos subyacentes. La alternativa parecía ineludible: o bien la «complejidad» se traducía en la aparición de propiedades nuevas, inanalizables, o bien, por el contrario, se reducía a una maraña de procesos más simples, una maraña ciertamente complicada, pero esencialmente no muy distinta de lo que definimos como simple.

Es inútil recordar el carácter desastroso de esta alternativa, los juicios perentorios que ha suscitado, tanto por parte de los que se agarraban a la menor dilucidación analítica de un comportamiento complejo para proclamar el éxito de la operación de reducción con la que identificaban dicho análisis, como por parte de los que replicaban que el método analítico sería siempre, por naturaleza, impotente para comprender la «vida», el «espíritu», la «sociedad».

En el prefacio de este libro hemos mostrado que ahora podía definirse una «complejidad intrínseca» que escapa a esta alternativa, en tanto que no representa la complicación de un gran número de factores simples enredados entre sí y en tanto que no es opaca a la inteligibilidad analítica. Ahora desarrollaremos el ejemplo que habíamos presentado, el de la «resurrección» de un sistema dinámico eventualmente implicado en una serie temporal de observables que se presenta como aleatoria.

Precisémoslo inmediatamente, no se trata de identificar tal sistema dinámico, en el sentido en el que podríamos precisar sus variables y escribir sus ecuaciones, sino de caracterizarlo de forma cualitativa.

En el caso en el que una serie de observables pueda permitir reconstruir una evolución hacia una subregión del espacio de fases en la que el sistema queda «prisionero» y caracterizado tan sólo por un comportamiento periódico, de período y amplitud bien definidos, la situación es simple: sabemos que tenemos un sistema de ecuaciones que genera un atractor de tipo «ciclo límite» (ver p. 187) y podemos deducir de la dimensionalidad del ciclo el número mínimo de variables de dicho sistema de ecuaciones.

Evidentemente, la situación es más complicada en el caso de los sistemas dinámicos a los que corresponden atractores «fractales». En este caso, el problema consiste en diferenciar la serie de observables de la que correspondería a un ruido aleatorio. El punto de partida del método presentado por Grassberger y Pocaccia [2] es descomponer la serie monodimensional de observa-

---

[2] P. Grassberger e I. Procaccia, en *Physica*, 9 D, 1983, pp. 189-208.

ciones que, como tal, no permite «someter a prueba» la dimensionalidad de un eventual atractor fractal, en n subseries. Cada subserie vuelve a tomar observaciones equidistantes en el tiempo, pero cada una tiene un punto de partida desfasado en el tiempo respecto a los demás: la primera parte de la observación en el tiempo t_1, la segunda en el tiempo $t_{1+\tau}$ la enésima en el tiempo $t_{1+(n-1)\tau}$... Esta descomposición permite un análisis estadístico que diferencia el «vagabundeo» fractal del ruido aleatorio. Podemos definir una función de correlación entre las diferentes subseries que revela la dimensionalidad eventual del atractor fractal.

En el caso del ruido aleatorio, se puede aumentar como se quiera el número de subseries temporales; por el contrario, las correlaciones estadísticas se transforman cualitativamente cuando el número de subseries sobrepasa la dimensión (fraccionaria) del atractor fractal. Esta dimensión fractal puede ser identificada y se podrá deducir el número mínimo de variables del sistema dinámico que engendra el atractor fractal: será el número entero inmediatamente superior a la dimensión fractal.

El análisis estadístico permite, correlativamente, definir un «exponente de Lyapunov», que caracteriza la inestabilidad del movimiento, es decir, que mide la tasa de divergencia a partir de situaciones similares y, por tanto, permite evaluar los límites de previsibilidad de la evolución determinada por el sistema dinámico.

Este método ha sido aplicado al problema de la variabilidad del clima a lo largo del último millón de años, tal como se puede inferir de las medidas de la proporción de oxígeno isotópico a partir de sedimentos procedentes de la zona ecuatorial del Océano Pacífico. Estas medidas permiten construir una serie de alrededor de 500 datos. La dimensión del atractor es del orden de 3,1, lo cual implica un sistema de ecuaciones que articulan un mínimo de cuatro variables. El límite de previsibilidad sugerido se sitúa entre veinticinco y cuarenta mil años [3] (ver también figura 27).

Así, para comprender las variacioens meteorológicas a largo plazo, complejidad y simplicidad no se oponen, sino que se relacionan de forma singular. Se podría pensar en este tipo de variación como el caso típico de comportamiento reducible en el que entran en juego muchos factores subyacentes, de variables ocultas. Pero, casi inesperadamente, parece no implicar más que cuatro variables. Sin embargo, la relación entre estas cuatro variables es tal que ningún análisis, por detallado que sea, podrá eliminar la imprevisibilidad esencial del fenómeno, es decir, en este caso, predecir más allá de veinticinco o cuarenta mil años (lo cual es poco en relación con las escalas de tiempo de estas variaciones). Otros fenómenos meteorológicos, como las variaciones anuales del clima en las latitudes medias, parecen poder ser estudiados siguiendo el mismo tipo de técnica. En un futuro próximo, podríamos estar

---

[3] C. Nicolis y G. Nicolis, «Is there a Climatic Attractor?», en *Nature*, vol. 311, 1984, pp. 529-532.

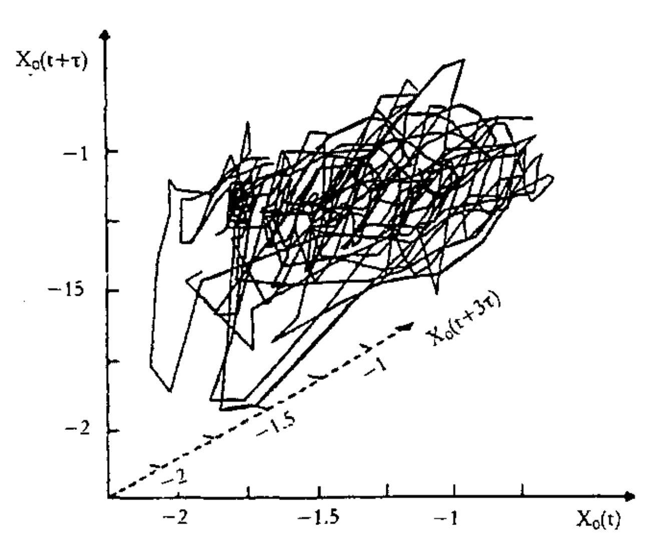


Figura 27. Representación del atractor climático en un espacio, el espacio tridimensional, con los desfases de τ y 3 τ. Esta representación utiliza alrededor de 5ƆO datos procedentes del banco de datos de la Universidad de Lovaina. El valor del desfase es de dos mil años.

en condiciones de saber, acerca de un número de fenómenos cada vez mayor, cuáles son las cuestiones pertinentes, cuáles son los límites intrínsecos a las tentativas de análisis y de predicción.

La complejidad está aquí unida a la inestabilidad. Significa una disociación profundamente inesperada entre la inteligibilidad de un fenómeno y la posibilidad de predecirlo. El descubrimiento de atractores extraños o fractales y su influencia en la exploración de los fenómenos observables para descubrir, entre las series de observaciones fenomenológicamente aleatorias, las que podrían ser expresión de un sistema dinámico determinista relativamente simple, constituyen una notable ilustración de la inventiva del diálogo científico. El papel desempeñado por las matemáticas en este diálogo en ocasiones ha sido puesto en cuestión: nos llevan a la búsqueda de las leyes, de las regularidades, de lo que es reproducible y dominable. Vemos aquí que las matemáticas son un factor esencial de esa inventiva. ¿Cómo podemos, sin ellas, concebir la extraña idea de una predicción de la imprevisibilidad? El rigor de las matemáticas no esclaviza al pensamiento, sino que le proporciona la audacia que alimenta y vuelve a plantear sin cesar las preguntas que nosotros formulamos a la naturaleza.

Esto ya fue visto por Jean Perrin en el texto quasi-profético en el que anunciaba lo que serían las matemáticas fractales y el nuevo tipo de inteligi-

bilidad que ellas permiten [4]. Ciertamente, explica en *Les Atomes,* los científicos se han dedicado en primer lugar a comprender los fenómenos regulares, los cuales permiten enunciar leyes y utilizarlas para predecir y manipular. Pero los matemáticos han sido los primeros en abandonar esas representaciones prácticas y en comprender que las curvas regulares, derivables en todos los puntos, realmente no son sino un caso particular. La lógica de los matemáticos, concluye Perrin, les ha llevado, antes que a los físicos, a concebir los límites de las tranquilizadoras representaciones de una realidad regular y predecible. Demasiado a menudo se ha olvidado que *Les Atomes,* que trastornó la cultura científica de comienzos del siglo XX, no es en absoluto la expresión de tesis reduccionistas. En nombre de la realidad hormigueante, llena de acontecimientos, en incesante transformación, es el concepto de ley regular lo que Perrin ponía en tela de juicio. El descubrimiento de las «leyes» cuánticas sin duda permite olvidar tal enjuiciamiento, pero hoy día lo volvemos a encontrar de nuevo.

La investigación de las leyes regulares, que someten un campo de los fenómenos a la predicción, no es una particularidad de la física. Es un ideal que persiguieron todas las disciplinas que tomaron la física como modelo. En esta medida, el nuevo giro del diálogo científico con el mundo físicoquímico puede tener consecuencias que se propaguen más allá de las fronteras disciplinarias.

Desde la época de las Luces, la investigación de las «leyes naturales» que gobiernan el comportamiento de los hombres y de su sociedad ha llevado a los que fueron fundadores de las ciencias económicas y sociales a intentar calcar sus métodos sobre los de la física clásica. Parecía ser el único medio de llevar un análisis «científico» supuestamente libre de todo valor. Estos «métodos objetivos» debían conducir a resultados con el halo de toda la autoridad de la ciencia.

Estas ideas aún siguen vigentes hoy en día. Un concepto como el de mercado, ahora encarnado en las instituciones económicas, pretende no solamente dar acceso a la vida económica tal como funciona de hecho hoy día, sino además corresponder a su funcionamiento por derecho. Y para ello, como es bien sabido, deberá proceder a hipótesis que asimilen enteramente los actores (compradores y vendedores) con entidades cuyo comportamiento está regido por un sistema coherente de relaciones. No se recordará lo que es el «hombre económico» de la teoría neoclásica, excepto para decir que sus diversos rasgos (y en particular la hipótesis de un «cálculo» de opciones gracias a una «función de utilidad» que integre todas las informaciones pertinentes en el momento de la elección), no tienen otro sentido que el de permitir un tratamiento matemático que es el de la mecánica racional.

Por otra parte, sabemos que los intentos por proporcionar a los actores

[4] J. Perrin, *Les Atomes,* reeditado en la colección Idées, París, Gallimard, 1970, pp. 15-18.

económicos un comportamiento más realista y, sobre todo, por dotarles de facultades de anticipación y, por tanto, de la posibilidad de especular sobre el futuro, han permitido desarrollos matemáticos apasionantes pero que, a su vez, conllevan la desaparición del ideal que constituía un comportamiento regular y previsible del sistema económico. El propio concepto de «ley económica» podría así no tener otra validez, absolutamente relativa, que la que construyen las diversas instituciones que tienden a dominar las variaciones, estabilizar los regímenes de funcionamiento, amortiguar el efecto de las fluctuaciones desestabilizadoras.

La confianza en la existenca de leyes económicas, la referencia a un funcionamiento «puramente económico» que permitiría hacerlas «actuar» sin obstáculos para alcanzar una situación óptima que definirían dichas leyes, corresponden aparentemente al método científico inaugurado por Galileo. Este último no vaciló en abstraer el razonamiento para llegar a la esencia del fenómeno de la caída de los cuerpos. Asimismo, Carnot y Clausius juzgaron los procesos físicoquímicos en nombre del ideal racional del cambio reversible. Dicho método, como ya hemos dicho, no es un método, sino una apuesta. Los movimientos descritos por Galileo parecen efectivamente admitir la simplificación; tomar en cuenta el rozamiento complica las ecuaciones, cambia su forma, pero no suprime su posibilidad. Por el contrario, desdeñar el carácter intrínsecamente irreversible de los procesos físicoquímicos, como también la diferencia entre los componentes humanos efectivos y los del «hombre económico», *establece la posibilidad* de las ecuaciones de la termodinámica del equilibrio y de la economía racional. En este caso, es el ideal de inteligibilidad el que se pone en tela de juicio, la investigación de leyes regulares, que justifica que se considere secundario aquello cuya eliminación condiciona la posibilidad de dichas leyes.

El ejemplo de la física y de la química, desde el siglo XVIII, ha servido para legitimar la identificación entre inteligibilidad y descubrimiento de leyes. Correlativamente, ha servido también para definir como natural e inevitable el hecho de que el individuo esté sujeto a estas leyes globales, que las iniciativas humanas sean tan incapaces de modificarlas que las insignificantes fluctuaciones que perturban sin cesar el estado de un gas en el equilibrio son incapaces de modificar la ley de los gases perfectos. Seguir hoy el ejemplo de la física y de la química, inspirarse en el nuevo diálogo experimental que se inventa en estas ciencias, llevaría sin lugar a dudas, con riesgo de perder las leyes, a *prestar atención a lo que fue eliminado como impureza,* y sobre todo al modo en que el futuro y el pasado intervienen en la definición del presente humano, a la dialéctica entre lo que asegura en la sociedad una estabilidad relativa, una autorreproducción parcial y la actividad humana que puede intentar recodificar el presente, modificarlo basándose en una lectura del futuro.

La evolución biológica nos ofrece el ejemplo de poblaciones que, cualquiera que sea el grado de iniciativa de los comportamientos individuales, su-

fren sin comprenderlas las transformaciones globales que generan dichos comportamientos. La limitación propia de los intentos de interpretación de la evolución biológica es la de no poder, por regla general, hacer intervenir más que las referencias al pasado, no poder suponer que los seres vivos predicen, o tratan de predecir, las consecuencias de su comportamiento presente para el futuro de su grupo. Pero es la limitación propia de los que intentan comprender la evolución humana que integran el hecho de que las acciones humanas se refieren a un futuro y no solamente a un futuro individual, sino a un futuro común. En el momento en que, sin duda por primera vez en nuestra historia, esta comunidad se refiere explícitamente a la Tierra entera, en el momento en que, como todos sabemos, nuestras sociedades desestabilizadas se acercan a un «punto de bifurcación», es bueno que las ciencias de la naturaleza contribuyan a recordar esta verdad: al contrario que las sociedades animales, las sociedades humanas *pueden* fijarse metas. El futuro no viene «dado».

La idea de una complejidad intrínseca, ligada a la inestabilidad, no es suficiente, sin embargo, para destruir la alternativa entre reduccionismo y doctrina de la emergencia inanalizable. Imprevisibilidad y producción de novedad no pueden identificarse sencillamente. Para los hombres, la producción de lo nuevo supone, en primer lugar, invención, descubrimiento de nuevos significados, cambio de sentido. De lo que, si fuera necesario, bastaría para testificar la historia de la física. La relatividad inventa un significado de la velocidad de la luz como constante universal. La mecánica cuántica inventa el significado de la constante de Planck, h. La incorporación de la flecha del tiempo a la dinámica inventa un significado de la inestabilidad dinámica. Y, correlativamente, se transforma el sentido de los formalismos en los que intervienen estas invenciones. El objeto dinámico no pertenece ya al tiempo universal de Newton, el ser cuántico no responde ya al ideal de una determinación simultánea del valor de las variables que la definen, el péndulo de comportamiento estable y predecible no es ya sino un caso límite singular de la dinámica.

La cuestión no es saber si la invención humana puede ser explicada por las ciencias del mundo físico-químico, sino ver si esta invención enfrenta al hombre con el resto del mundo, si hace de él un extraño en un mundo de evoluciones quizá imprevisibles, pero no innovadoras. Es verdad que, incluso si, debido a la inestabilidad intrínseca del sistema planetario, la luna se alejara un día «espontáneamente» de su órbita periódica alrededor de la tierra, no podríamos hablar en este caso de «innovación». Por el contrario, la riqueza de esta primera idea de complejidad intrínseca ligada a la inestabilidad es que son *las propias* interacciones, *el mismo* tipo de causalidad, las que, después de asegurar la estabilidad de la órbita lunar, determinaría su inestabilidad.

Por tanto, la noción de causalidad nos hace reflexionar. Pero esta noción se encuentra profundamente modificada por la física lejos del equilibrio. Di-

cha modificación subraya además en sí misma lo que siempre fue la originalidad del modo de conceptualización termodinámica respecto a la explicación dinámica.

Desde el punto de vista termodinámico, el problema esencial ha sido siempre el de la estabilidad macroscópica y el de la selección de las variables pertinentes que permiten dicha estabilidad. La termodinámica de los sistemas en equilibrio define el estado de un sistema que contiene miles y miles de millones de moléculas, como un estado macroscópico descrito por un pequeño número de variables. Puede hacerlo porque este estado macroscópico es estable respecto a la actividad microscópica incesante que él resume. El segundo principio establece la posibilidad de desdeñar el detalle de los miles de millones de procesos que tienen lugar simultáneamente en cada instante, garantizando la regresión de toda fluctuación que perturba el estado de equilibrio. A diferencia de la dinámica, la termodinámica tiene un método *selectivo*. Se dedica a representar los mecanismos de evolución del sistema sólo en la medida en que dichos mecanismos tienen un significado, es decir, que permiten predecir el régimen macroscópico que adoptará el sistema.

Ahora bien, el estudio de los sistemas lejos del equilibrio nos enseña que esta selección no puede tener lugar de una vez por todas. Depende de las circunstancias, esto es, de la desviación del equilibrio y, por tanto, de los flujos de calor o de la materia que alimentan el sistema.

¿De qué es capaz la materia? Esta pregunta es hoy más rica de lo que se podría esperar. Conocemos ya el estado de equilibrio, estado indiferente, en el que todos los procesos se compensan mutuamente, en el que ningún acontecimiento local puede tener consecuencias. Pero conocemos también las situaciones críticas en las que, por el contrario, el sistema se convierte en una verdadera totalidad, no una totalidad armoniosa y estable, sino un estado literalmente no representable. En él nada es ya insignificante, todo suceso tiene consecuencias que se propagan a través de todo el sistema; ninguna selección, ninguna simplificación está justificada, y la idea misma de nivel macroscópico pierde su significado. Conocemos también, en otras circunstancias, el proceso de nucleación, con la aparición de un umbral a partir del cual un suceso local será significativo y una fluctuación podrá amplificarse. Y conocemos por supuesto las estructuras disipativas, con su impresionante coherencia. Aquí se engendra un tipo nuevo de régimen macroscópico por la multitud de los procesos microscópicos y no se trata ya de un simple estado intermedio, resultante indiferente de numerosos procesos, esencialmente independientes unos de otros; hay que pensar en la aparición de un verdadero comportamiento colectivo que nos impone modificar no ya nuestra representación de lo que es un proceso microscópico, sino de lo que pueden producir *conjuntamente* gran número de procesos.

Los físicos definen estos nuevos tipos de comportamiento mediante la idea de «correlación». El estado de equilibrio, que tradicionalmente se había considerado como la figura misma del gran número, se define ahora como

un estado singular en el que las correlaciones son de alcance e intensidad nulos, es decir, en las que los diversos procesos locales no se relacionan entre sí [5]. Lejos del equilibrio surgen las correlaciones, que nos obligan a modificar nuestros conceptos de lo que significa «estar juntos», incluso para las moléculas, esto es, a transformar nuestros modos de representación del nivel macroscópico y nuestros criterios de selección sobre lo que tiene o no significación.

En otras palabras, en rigor, no se debería hablar de un sistema como «seno de una actividad disipativa», porque es la actividad disipativa lejos del equilibrio y las correlaciones de largo alcance que ella suscita [6], las que transforman una población de moléculas con interacciones ocasionales en un verdadero sistema en el que las moléculas se relacionan unas con otras. El sistema, en tanto en cuanto es portador de significado, en tanto en cuanto su estudio implica instrumentos formales bien definidos, no es previo a su régimen de funcionamiento, porque es la intensidad de su actividad disipativa la que le confiere este significado.

Por tanto, nos enfrentamos con un nuevo tipo de causalidad. En el equilibrio y cerca del equilibrio, la definición del concepto de causa no planteaba problemas graves. Si se aumentaba, por ejemplo, la temperatura de una mezcla de reactivos, se desplazaba su estado de equilibrio y este desplazamiento era proporcional a la modificación aplicada. Sin tener que describir en detalle los procesos químicos implicados, se podía, sin problema alguno, definir la modificación aplicada como «causa» del desplazamiento, es decir, de la modificación de las concentraciones de los reactivos químicos. Pero tomemos el caso de la inestabilidad de Bénard que hemos descrito en el capítulo «Los tres estadios de la termodinámica». Aquí también, intensifiquemos ligeramente la limitación que mantiene al sistema lejos del equilibrio, el flujo de calor que lo atraviesa de arriba abajo. Si esta modificación nos hace salvar el umbral de inestabilidad, no tendremos un simple desplazamiento del estado estacionario, sino una transformación global del sistema, la aparición de células de convección. Correlativamente, el proceso global de transporte de calor se hará más rápido, lo cual significa que, si queremos mantener la diferencia de temperatura que permite la aparición de las células de Bénard, *deberemos suministrar más calor al sistema.*

La propia idea de la limitación ha cambiado su significado. A este lado del umbral de inestabilidad se puede decir que la limitación impone la actividad disipativa del sistema, su intensidad es proporcional a aquélla; en este sentido se puede hablar de «causalidad». Más allá del umbral de inestabili-

[5] Véase especialmente M. Malek Mansour, C. Van den Broek, G. Nicolis y W. Turner, «Asymptotic Properties of Markovian Master Equations», en *Annals of Physics*, vol. 131, 1981, pp. 283-313.

[6] M. Malek Mansour, en preparación.

dad, el sistema no soporta ya la limitación y se organiza a partir de ella y su actividad toma un carácter autodeterminado. Por tanto, no es posible hablar de actividad de una estructura disipativa como «causada» por la limitación que determina la desviación del equilibrio. La limitación produce un efecto *singular*, con el que no tiene una relación simple.

Lejos del equilibrio, la idea de limitación cambia de significado. Daremos dos ejemplos que demuestran que su definición misma depende de la actividad del sistema.

En la Tierra, todos los cuerpos están sometidos a la gravedad, la fuerza gravitacional, incluso las moléculas de un sistema físicoquímico. Por tanto, aquí es una limitación general, pero cuando se trata de sistemas físicoquímicos en equilibrio, esta limitación puede desdeñarse.

Efectivamente, el movimiento térmico de las moléculas es suficiente para anular el efecto del campo gravitacional. Sin embargo, puede estar mucho más lejos del equilibrio, más allá del umbral de inestabilidad. En este caso, hay que tener en cuenta la limitación gravitacional, ya que se amplifica de forma drástica por la actividad intrínseca del sistema. Puede provocar una modificación del diagrama de bifurcaciones (definido en pp. 192-193). A esto se lo denomina un fenómeno de «bifurcación asistida». Dos régimenes macroscópicos que, en ausencia de campo exterior, serían perfectamente equivalentes, igualmente accesibles a partir de la amplificación de tal o cual fluctuación son, sin embargo, distintos. Uno es privilegiado: puede ser alcanzado por el sistema sin transición discontinua a partir del estado estacionario inestable, mientras que el segundo reclama una perturbación de magnitud finita. Respecto del primero, el régimen estacionario es inestable; respecto del segundo, solamente metastable (ver figura 28). Podemos decir que, lejos del equilibrio, la materia se vuelve *sensible* a ciertas influencias a las que era insensible en el equilibrio [7].

En una situación experimental concreta, los flujos que alimentan un sistema nunca son estrictamente uniformes, sino más o menos fluctuantes. El modelo matemático suele despreciar este ruido, definido como insignificante. Y ciertamente, en el equilibrio no tiene efectos significativos. Pero aquí, lejos del equilibrio, la situación puede cambiar. Podemos mostrar que un flujo modulado de forma aleatoria conlleva la aparición de nuevas posibilidades de comportamiento estable. El sistema lejos del equilibrio se ha vuelto *sensible* al ruido que, en el equilibrio, no tenía ninguna consecuencia observable [8].

---

[7] Véase D. K. Kondepudi e I. Prigogine, en *Physica*, vol. 107 A, 1981, pp. 1-24; D. K. Kondepudi, en *Physica*, vol. 115 A, 1982, pp. 552-566.

[8] R. Lefever y W. Hortshemke, «Multiple Transitions Induced by Light Intensity Fluctuations in Illuminated Chemical Systems, en *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, vol. 76, 1979, pp. 2490-2494; R. Lefever y W. Hortshemke,

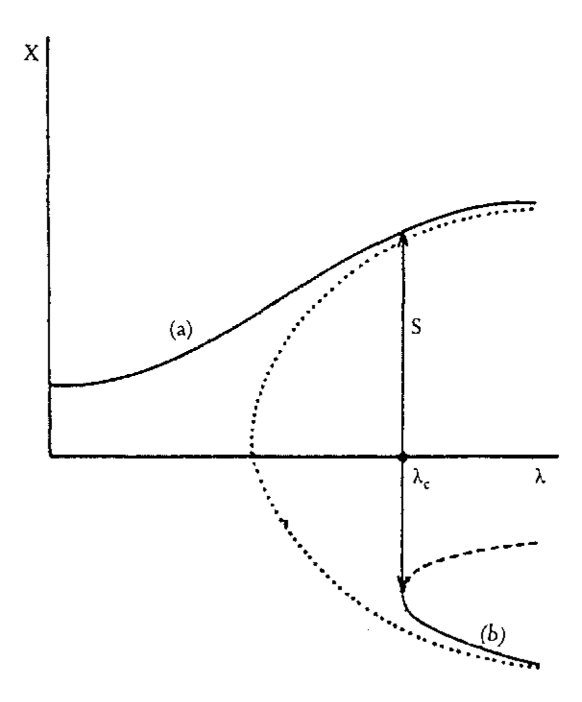


Figura 28. Fenómeno de bifurcación asistida en presencia de un campo exterior. La línea punteada marca la bifurcación simétrica que tendría lugar en ausencia de este campo. En su presencia, en cambio, la bifurcación se hace asimétrica: la rama *a* surge de manera continua mientras que el parámetro de bifurcación crece; la rama *b* no puede alcanzarse más que a partir de un valor crítico de este parámetro, por una perturbación de magnitud finita.

Hablar aquí de sensibilidad significa que el campo gravitacional o el ruido aleatorio que modula el flujo no tienen un efecto general (por ejemplo, un gradiente vertical de intensidad o un régimen macroscópico ruidoso). Lo que provocan no se les *parece*. Se ven incluidos de forma específica en el proceso de estructuración del sistema. Por tanto, el sistema ya no es solamente abierto en el sentido de que se alimenta de flujos que lo mantienen lejos del equilibrio, sino también en tanto en cuanto puede ser *informado* de manera selectiva acerca de pequeñas diferencias que en el equilibrio son insignificantes.

Lejos del equilibrio, *a partir del régimen colectivo de actividad y no* a prio-

---

Noise-Induced Transitions Theory and Applications to Physics, Chemistry and Biology, Berlín, Springer Verlag, 1984.

ri *y de una vez por todas* se decide lo que es insignificante y lo que debe tomarse en cuenta. No sabemos *a priori* de qué es capaz una población química y no podemos tampoco *a priori* establecer una diferencia entre lo que debemos tomar en cuenta y lo que podemos despreciar. Este descubrimiento da un nuevo significado a la idea de complejidad. No es tan sólo la predicción la que plantea un problema, sino también la definición del sistema, la definición de su relación con el entorno.

Esta idea de complejidad representa, creemos nosotros, la diferencia principal entre el enfoque analítico y la retórica reduccionista. Mientras que esta última, de una forma o de otra, concluye siempre con un «nada más que», porque se basa en la relativa simplicidad de los comportamientos elementales para intentar *juzgar* el comportamiento del conjunto, el enfoque analítico, frente a un comportamiento dado, permite pensar que éste no es el único posible, que en otras circunstancias lo que tenemos es capaz de otras muchas cosas. Lejos de conducir a la idea de un mundo más simple, el análisis nos permite acceder a un mundo complejo, que no podemos ya juzgar, pero que debemos explorar.

Además, se dibujan nuevas vías de diálogo con la naturaleza, ya que el diálogo experimental vuelve a manifestarse en su carácter de juego arriesgado, cuyo objetivo es la pertinencia de la pregunta, la legitimidad de la simplificación. Toda pregunta experimental presupone una hipótesis en cuanto a aquello a lo que es sensible el objeto interrogado y ningún método es neutro respecto a este problema.

No hace falta decir que esta cuestión de pertinencia se plantea de forma más crucial todavía en el estudio del comportamiento de los seres vivos, esto es, seres que no han sido preparados en el laboratorio, sino que son producto de historias múltiples, la de su especie, la suya y, eventualmente, la del grupo al que pertenecen. Aquí, más aún que en físicoquímica, la experimentación entraña un riesgo y el que intente «purificar» su objeto para obtener observaciones controlables y reproducibles siempre corre el peligro de intervenir activamente en la definición de aquello que observa. La complejidad del ser vivo, es decir, en especial la cuestión de saber a qué es *sensible*, qué informa su comportamiento, a menudo se ha considerado como un obstáculo a la experimentación, porque impedía estudiar el ser vivo como un sistema físicoquímico, aislado y controlado. Sin duda, veremos desarrollarse una experimentación que transforme este obstáculo en algo positivo, es decir, que no intente neutralizar el contexto experimental, sino que trate de descubrir el «significado» que tiene la interrogación experimental para el objeto interrogado.

El descubrimiento de la complejidad es, ante todo, un desafío. Nos recuerda que nuestras ciencias están todavía dando sus primeros pasos, que fueron apasionadas pero a veces presuntuosas. Hoy empezamos a reconocer lo que implica la idea de un mundo intrínsecamente activo y, por tanto, a comprender hasta dónde llega nuestra ingnorancia. Pero esta complejidad lleva

también consigo la esperanza de una nueva identidad de la ciencia, la esperanza que evoca el título de nuestro libro, *La nueva alianza.* Con este título afirmábamos que, más allá de falsas clasificaciones, de prohibiciones, de limitaciones culturales, políticas y económicas, las ciencias no tienen, por derecho, otro límite que el de la creatividad humana. No son una limitación fatal a la que deberíamos someternos, sino una limitación que produce un significado que no dejamos de crear y que podemos crear de forma que no construyamos contra ella, sino con ella, las nuevas vías de diálogo entre los hombres y con el mundo que habitan.

Agradecimientos

Quisiéramos expresar aquí nuestro reconocimiento a nuestro amigo León Rosenfeld, quien, en vida, nos ayudó y animó a volver sobre los problemas que él mismo contribuyó a esclarecer. Su recuerdo nos ha acompañado a lo largo de este trabajo.

Muchos trabajos presentados y comentados en este libro han sido realizados en estrecha colaboración con nuestros colegas de Bruselas y también de Austin.

Una versión preliminar de este libro se sometió a los comentarios y críticas de algunos amigos, mientras que otros nos aportaron informaciones y referencias muy valiosas. No podemos nombrar aquí a todos aquellos cuya ayuda ha hecho posible este libro, pero sí queremos expresarles nuestra profunda gratitud.

Finalmente, uno de los autores se ha beneficiado, durante parte de las investigaciones que han permitido hacer este libro, de una beca del Fondo Nacional de Investigación Científica belga.

INDICE ONOMASTICO